

CAPÍTULO 5

DESCRIÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS DE RECARGA ARTIFICIAL REALIZADAS NO AQUÍFERO SUPERFICIAL DA CAMPINA DE FARO

5 DESCRIÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS DE RECARGA ARTIFICIAL REALIZADAS NO AQUÍFERO SUPERFICIAL DA CAMPINA DE FARO

5.1 Introdução

Neste Capítulo descrevem-se os ensaios *in situ* de recarga artificial realizados na Campina de Faro e analisam-se os resultados obtidos. Assim, o Capítulo inicia-se com uma breve abordagem aos aspectos teóricos que caracterizam o escoamento no meio subterrâneo, essenciais para a compreensão e análise dos resultados obtidos. O principal objectivo destes ensaios foi avaliar o desempenho de diferentes metodologias de recarga artificial do aquífero superficial, em termos de taxas de infiltração, avaliar os efeitos da sua aplicação, em termos de qualidade da água subterrânea recorrendo a fontes de água alternativas, como o escoamento superficial, e determinar parâmetros hidráulicos do aquífero, designadamente permeabilidades e velocidades de escoamento no meio subterrâneo. A informação obtida, após a sua incorporação no modelo matemático de escoamento subterrâneo e de transporte, que será apresentado no Capítulo 6, permitirá obter uma perspectiva do desempenho destas metodologias de recarga numa escala maior, abrangendo a zona central da Campina de Faro, referida nos Capítulos iniciais como a zona onde a poluição causada pelas práticas agrícolas se concentra. A decisão a tomar será realizada com o auxílio de um modelo de decisão a desenvolver no Capítulo 7 em função de diferentes cenários e critérios seleccionados.

A realização de ensaios de campo numa escala intermédia possibilitou a obtenção de valores mais fiáveis, em termos de reprodução do meio, do que ensaios de laboratório ou mesmo ensaios numa escala pequena.

Os dois locais seleccionados para a implementação dos ensaios de recarga artificial localizam-se numa área central do sistema aquífero da Campina de Faro, o primeiro no leito do rio Seco, próximo da zona de Carreiros, e o segundo numa área a SE, próximo

da zona do Areal Gordo (ver Figura 5.1). A selecção do primeiro local estava dependente da proximidade da fonte de água que se pretendia utilizar para a recarga, nomeadamente o escoamento superficial no rio Seco, que atravessa a Campina de Faro no seu limite oriental. O rio Seco constitui o curso de água com volume de escoamento mais importante na zona de estudo, contudo apenas concentrado durante a estação húmida e após episódios intensos de precipitação. Por sua vez, a selecção do segundo local estava dependente das zonas de afloramento das formações arenosas na Campina de Faro, uma vez que apenas se tornaria viável a realização de recarga artificial, por infiltração à superfície do solo, neste tipo de formações mais permeáveis, em oposição às formações aluvionares que afloram numa parte importante da área de estudo.

Assim sendo, os ensaios de recarga artificial realizados recorreram à aplicação de dois tipos de técnicas de recarga vulgarmente utilizadas no caso de aquíferos freáticos, nomeadamente através de recarga em bacias de infiltração ou através de injeção directa, recorrendo a poços de grande diâmetro (vulgarmente referidos como noras) e recorrendo a um furo de médio diâmetro. A monitorização das águas subterrâneas foi realizada por intermédio de piezómetros (LNEC1, LNEC2, LNEC3, LNEC4 e LNEC5; ver Figura 5.1 com a sua localização), equipados com sensores multiparamétricos para registo contínuo de parâmetros de qualidade e variação de nível. A construção destas infra-estruturas e a implementação dos ensaios de recarga artificial foram realizadas no âmbito do Projecto Gabardine.

Parte dos resultados que se apresentam neste Capítulo foram publicados em Lobo-Ferreira *et al.* (2007a), Lobo-Ferreira *et al.* (2007b) e Diamantino *et al.* (2007).

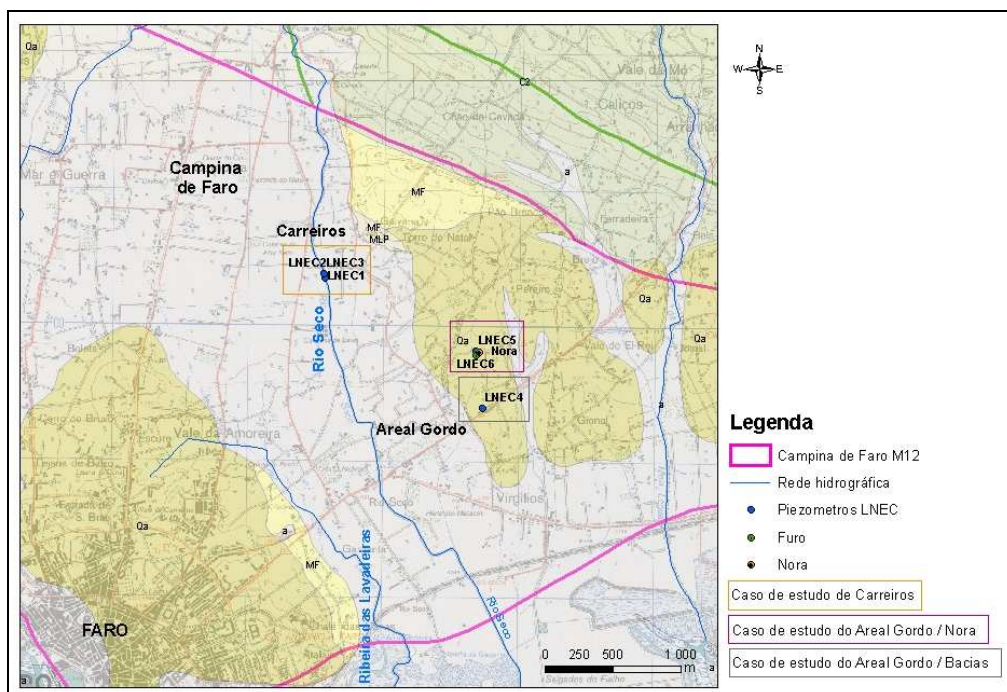


Figura 5.1 – Localização das áreas de estudo

5.2 Abordagem sobre formulação teórica

A abordagem sobre aspectos teóricos insere-se essencialmente sobre as expressões teóricas que traduzem o escoamento subterrâneo, utilizadas neste Capítulo para a determinação de taxas de infiltração e parâmetros hidráulicos característicos das

formações litológicas onde foram desenvolvidos os ensaios que são aqui descritos. Esta abordagem foi descrita anteriormente na Secção 2.7 do Capítulo 2.

A velocidade de escoamento de uma partícula de água (velocidade de Darcy - V_D e velocidade intersticial - V_i) e a condutividade hidráulica do meio saturado (K) foram determinadas pela Eq. 2.2, Eq. 2.3 e Eq. 2.4, respectivamente.

Para os cálculos efectuados utilizou-se, em vez do valor de porosidade eficaz (n_e) da Eq. 2.3, que não foi determinado, o valor de n_t determinado pelos ensaios laboratoriais (cf. Capítulo 4). Stephnes *et al.* (1997) projecta no gráfico da Figura 5.2 a relação existente entre a porosidade do meio e a dimensão das partículas, separando as duas componentes do armazenamento de água num solo (Eq. 2.5). Pode observar-se, por exemplo, no caso das areias, n_e tem valores altos, de 0,32 e S_r valores baixos, de 0,08, para um n_t de 0,40. Assim, para as areias, que é o tipo de litologia dominante na área de estudo, os valores de n_t e n_e não serão muito dispares, pelo que se assumiu que: $n_t \approx n_e$. No entanto, os valores da V_i e K determinados estão ligeiramente sobrestimados.

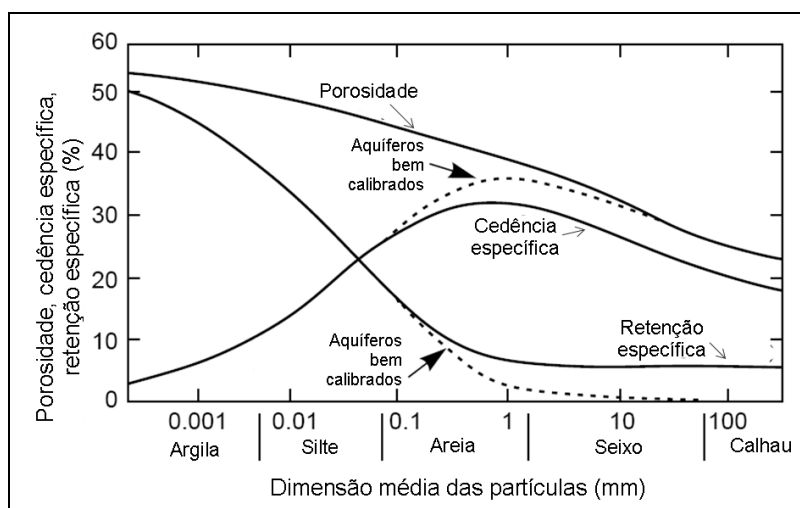


Figura 5.2 - Relação entre dimensão média das partículas e as propriedades do armazenamento das formações (Stephnes *et al.*, 1997)

5.3 Ensaios de recarga artificial no Areal Gordo

Na zona do Areal Gordo foram realizados ensaios de recarga artificial recorrendo a bacias de infiltração e à injeção de água num poço e num furo. Estes ensaios foram realizados no interior da propriedade da empresa de extracção de areias e pedras Areal Gordo, S.A. O objectivo destes ensaios, a metodologia seguida e os resultados obtidos apresentam-se de seguida.

5.3.1 Bacias de infiltração

Na zona do Areal Gordo as formações aflorantes são as areias e cascalheiras de Faro-Quateira. A descrição litológica deste local foi complementada com a informação proveniente de um piezómetro construído para a monitorização dos ensaios de recarga (LNEC4) cujo log se apresenta na Figura 5.3. A escavação permitiu confirmar com exactidão a espessura desta formação e das duas unidades litológicas subjacentes, ainda na zona não saturada do solo. O primeiro estrato litológico corresponde a areias

vermelhas grosseiras e tem cerca de 2 metros de espessura; o segundo estrato corresponde às areias acastanhadas, com cerca de 6 metros de espessura e sob este surgem as areias amarelas. O nível piezométrico encontra-se aos 11 metros de profundidade (Fev./2007). A profundidade do piezómetro LNEC4 atingiu os 23 metros, não tendo havido variação significativa na litologia correspondente à zona saturada (Figura 5.3).

A profundidade das três bacias de infiltração coincidiu com os estratos arenosos referidos. Assim, a 1ª bacia estava aberta no 1º estrato (2 metros de profundidade), a 2ª bacia no 2º estrato (6 metros de profundidade) e a 3ª bacia no 3º estrato (8 metros de profundidade). De salientar que, no caso da 1ª bacia, se beneficiou da existência de bacias de evaporação da água disponíveis no local e que as 2ª e 3ª bacias foram abertas no mesmo local, tendo primeiro sido feitos os ensaios de recarga na bacia mais superficial e após a sua conclusão procedeu-se à abertura e posterior realização dos ensaios na bacia mais profunda. Na última bacia foi também realizado um ensaio de traçador com cloreto de sódio.

5.3.1.1 Objectivos e metodologia

O principal objectivo consistiu na determinação, por ensaios *in situ*, das taxas de infiltração correspondentes a cada uma das camadas litológicas presentes no local. A realização de um ensaio de traçador numa das bacias permitiu inferir sobre os valores de permeabilidade nas zonas não saturada e saturada do solo. Esta informação foi complementada com ensaios laboratoriais em coluna de solo, realizados com amostras de solos indeformadas retiradas do fundo das bacias, tendo os resultados obtidos sido apresentados no Capítulo 4.

O equipamento de monitorização utilizado foi o seguinte: (1) escalas gráficas com 1 metro de altura para medição da altura da água nas bacias; (2) *diver* para registo com intervalos de 1 minuto da altura da água colocado no fundo da bacia; (3) sondas multiparamétricas (ref. Troll9500 da marca *InSitu Inc.*), equipadas com sensores para registo com intervalos de 1 minuto de nível piezométrico, parâmetros físico-químicos da água (temperatura, pH, condutividade eléctrica, potencial redox (Eh), concentrações de nitratos (NO₃) e cloretos (Cl)); (4) sonda de medição manual da profundidade ao nível da água, para controlo dos níveis durante os ensaios; (5) barómetro para leituras da pressão atmosférica; (6) caudalímetro instalado no tubo de descarga de água proveniente do furo de extracção.

5.3.1.2 Descrição dos ensaios e resultados obtidos

A) Bacia de infiltração na 1ª camada litológica (areias vermelhas)

O ensaio de infiltração realizado na primeira bacia destinava-se a obter a capacidade de infiltração corresponde às areias vermelhas. No Areal Gordo existem diversas bacias de grandes dimensões (área≈1000 m²), pertencentes à indústria de extracção de areias aí localizada, que se destinam à descarga da água resultante da lavagem das areias e separação da componente fina, que acaba por se depositar no fundo da bacia. Quando a água evapora é feita a remoção da fracção fina depositada no fundo da bacia e o seu

aproveitamento para solos agrícolas. Estas bacias têm cerca de 2 metros de profundidade e na sua base afloram as areias vermelhas.

Numa destas bacias foi colocada durante sete dias uma escala gráfica para medição da descida do nível da água na bacia (Figura 5.3). A altura da água era de 60 cm no início do ensaio. A variação registada foi pouco significativa. Tendo em atenção a componente de evaporação da água, não quantificada, que não é de desprezar numa bacia com uma grande dimensão, não foi possível diferenciar as duas componentes, pelo que se considerou neste horizonte uma taxa de infiltração muito baixa, não quantificada com exactidão.



Figura 5.3 – Coluna litológica do piezómetro LNEC4 e sua relação com o perfil vertical dos estratos litológicos na zona não saturada, no Areal Gordo. Pormenor da bacia de infiltração nas areias vermelhas (Lobo Ferreira *et al.*, 2007b)

B) Bacia de infiltração na 2ª camada litológica (areias acastanhadas)

A bacia de infiltração escavada nas areias acastanhadas ficou com uma área (de fundo) de 80 m². Na Figura 5.4 pode observar-se em fotografia aérea o local de implantação da bacia e a localização do piezómetro LNEC4, 4 metros para SE. A Figura 5.5 mostra alguns pormenores da bacia, antes e durante o ensaio de infiltração. A água utilizada no ensaio de recarga foi extraída de um furo de captação no aquífero confinado, a mais de 100 metros de profundidade. Este furo localiza-se a cerca de 150 metros, a Norte do piezómetro LNEC4, de modo que, supõe-se que a bombagem não interferia com o aquífero freático. O ensaio durou três dias, iniciando-se no dia 13/02 às 9h:25m com o enchimento da bacia, utilizando-se um caudal de enchimento de cerca de 15,8 m³/h. O enchimento da bacia até aos 80 cm de altura de água demorou cerca de quatro horas, tendo-se reduzido o caudal para 2 m³/h de forma que não fosse excedida a altura de água de um metro. No 2º dia o caudal de enchimento foi reduzido para 1,56 m³/h e no 3º dia para 0,15 m³/h. O ensaio terminou no dia 16/02 às 12:00h, mas a bacia ainda teve água durante 10 dias.

O objectivo inicial do ensaio era manter o nível de água constante na bacia durante três dias com um metro de altura e, registar com um caudalímetro, o volume de água descarregado para a bacia. Deste modo, o volume de água adicionado à bacia

corresponderia ao volume infiltrado. Na prática, algumas modificações tiveram que ser realizadas ao procedimento inicialmente programado. Uma dessas modificações foi a necessidade de interromper a descarga de água para a bacia durante a noite, pelo que se procedeu durante este período de tempo ao registo da variação da altura da água na bacia para cálculo da taxa de infiltração. O caudal era repostado no dia seguinte tendo em consideração o volume de água infiltrado durante a noite. O registo da variação da altura de água era feito pela observação visual da escala graduada colocada na bacia. Os valores para o volume de água infiltrado foram subestimados no 2º dia e sobrestimados no 3º dia do ensaio.



Figura 5.4 – Localização da zona de implantação das bacias de infiltração (2ª e 3ª) e piezómetro de monitorização LNEC4 no Areal Gordo (mapa retirado do Google Earth)



Figura 5.5 – Bacia de infiltração na 2ª camada litológica, antes e após o seu enchimento. Pormenor do piezómetro LNEC4 durante o registo manual da profundidade do nível da água

B.1) Análises dos resultados obtidos (quantidade)

A análise dos resultados obtidos através do registo contínuo da altura da água fornecido pela sonda colocada na bacia (Figura 5.6 e Figura 5.7) permitiu estimar, de forma mais rigorosa, os volumes de água que se infiltraram, sem reposição de água na bacia (durante a noite) e durante os períodos de reposição de água (durante o dia). Na Figura 5.7 representam-se alturas de água na bacia separadamente para cada dia do ensaio. No Quadro 5.1 apresentam-se os valores através dos quais se estimou o volume de água infiltrado e a taxa de infiltração para cada ensaio (designados por 1º, 2º e 3º ensaio) e no Quadro 5.2 os valores através dos quais se estimou o volume de água infiltrado e a taxa de infiltração durante os períodos de enchimento inicial e seguintes (designados por 4º, 5º, 6º e 7º ensaio), conhecendo o volume de água colocado na bacia durante os respectivos períodos. As taxas de infiltração aumentaram com o decorrer dos ensaios e foram de 0,04, 0,08 e 0,22 m/d, com um valor médio de 0,12 m/d. As taxas de

infiltração determinadas durante os períodos de enchimento variaram entre 0,18 e 0,09 m/d, com um valor médio de 0,13 m/d. Obtiveram-se valores médios semelhantes nas duas estimativas realizadas. Uma terceira estimativa, menos rigorosa, foi feita considerando que entre o início e o fim do ensaio decorreram 63,5 horas, atingindo-se a mesma altura de água na bacia de 83,3 cm no início e no fim, e que durante este período de tempo foi colocado um volume de água de 26,41 m³. A taxa de infiltração assim estimada foi também um valor muito semelhante, de 0,12 m/d. Não foi possível estabelecer uma relação entre a altura da água na bacia e o respectivo valor da taxa de infiltração calculado, por não existir informação suficiente.

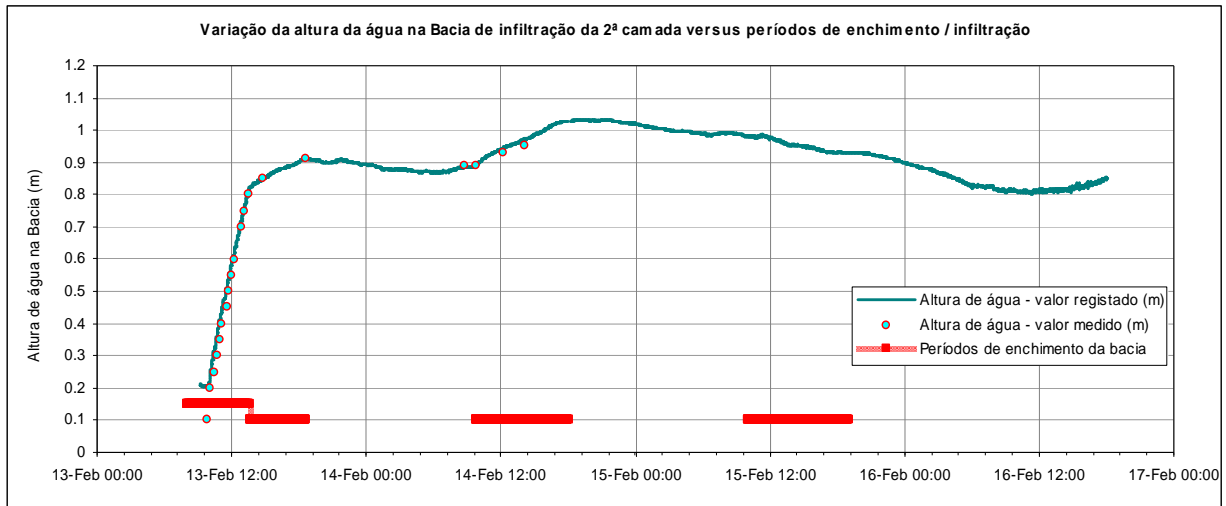


Figura 5.6 – Variação da altura da água na bacia de infiltração na 2ª camada litológica, durante o ensaio de recarga de três dias (Lobo Ferreira *et al.*, 2007b)

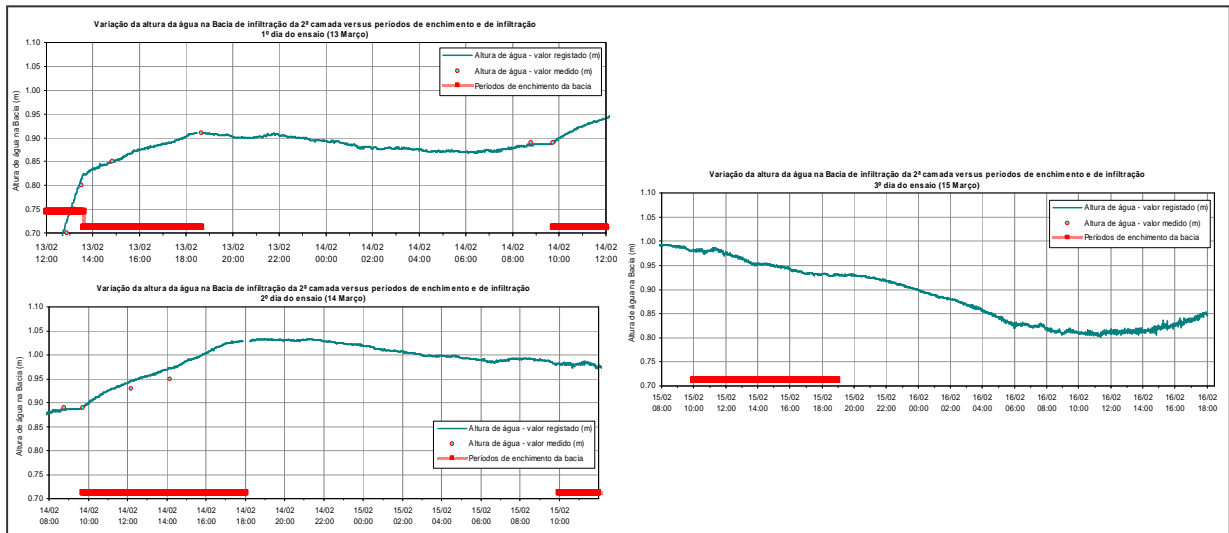


Figura 5.7 – Variação da altura da água na bacia de infiltração na 2ª camada, separadamente para cada um dos três dias do ensaio de recarga

Quadro 5.1 - Quantificação do volume de água infiltrado e taxa de infiltração para cada ensaio de recarga na bacia da 2ª camada

Ref. Ensaio	Hora	H (m)	ΔH (m)	ΔT (s)	H no início (m)	Volume de água na bacia (m ³)	Volume de água infiltrado (m ³)	Taxa de infiltração (m/d)
1º Ensaio	13/02 18:26	0,910	0,026	51720	0,910	72,80	2,08	0,04
	14/02 08:48	0,884		14,36 h				
2º Ensaio	14/02 17:52	1,029	0,050	51660	1,029	82,32	4,00	0,08
	15/02 09:52	0,979		14,35 h				

Capítulo 5 – Descrição das experiências de recarga artificial realizadas na Campina de Faro

Ref. Ensaio	Hora	H (m)	ΔH (m)	ΔT (s)	H no início (m)	Volume de água na bacia (m ³)	Volume de água infiltrado (m ³)	Taxa de infiltração (m/d)
3º Ensaio	15/02 19:00	0,930	0,104	40380	0,930	74,40	8,32	0,22
	16/02 06:13	0,826		11,22 h				
MÉDIA					0,956	76,51	4,80	0,117

H (m) – altura de água na bacia

ΔH (m) – variação da altura de água na bacia

ΔT (s) – Intervalo de tempo

Quadro 5.2 – Parâmetros medidos durante os períodos de enchimento. Quantificação do volume de água infiltrado e taxa de infiltração para cada ensaio de enchimento da bacia.

Ref. Ensaio	Dia/Hora	H (m)	ΔH (m)	ΔT (s)	H inicial (m)	Vc inicial (m ³)	Vc adicionado (m ³)	Vr adicionado (m ³)	Vinf. durante o enchimento (m ³)	Taxa de infiltração (m/d)
4º Ensaio	13/03 09:25	0	0,824	15060	0	0	65,92	≈ 65,89 ^(a)	n.d.	n.d.
	13/03 13:36	0,824		4,18 h						
5º Ensaio	13/02 13:36	0,824	0,086	17400	0,824	65,92	6,88	9,83	2,95	0,18
	13/02 18:26	0,910		4,83 h						
6º Ensaio	14/02 09:44	0,889	0,140	35220	0,889	71,12	11,2	15,23	4,03	0,12
	14/02 17:52	1,029		9,78 h						
7º Ensaio	15/02 10:04	0,979	-0,049	32160	0,979	78,32	-3,92	1,35	2,57	0,09
	15/02 19:00	0,930		8,93 h						
MÉDIA									3,18	0,13

H (m) – Altura de água na bacia

ΔH (m) – Variação da altura de água na bacia

ΔT (s) – Intervalo de tempo

Vc (m³) – Volume de água calculado com base na variação da altura da água (inclui a componente infiltrada)

Vr (m³) – Volume de água registado no caudalímetro

Vinf. (m³) – Volume de água infiltrado

^(a) Valor estimado com base em leituras no local sem contagem pelo caudalímetro. Valor idêntico ao volume de água calculado, mas que não permitiu inferir sobre uma eventual infiltração de água durante o período de enchimento inicial de 4 horas.

B.2) Análises dos resultados obtidos no piezómetro LNEC4

No piezómetro LNEC4 registou-se, continuamente, a profundidade do nível da água (Figura 5.8), desde o início do ensaio no dia 14/03 até ao dia 26/06. Neste gráfico está também representada a variação da altura da água na bacia e os valores de precipitação registados no local do ensaio.

A variação da altura da água apresenta, após terminadas as entradas de água intencionais para a bacia, um comportamento distinto: 1º período, entre os dias 16 e 20, em que se verifica uma elevação da altura da água e 2º período, após o dia 20 em que se verifica uma estabilização dos valores. Constatou-se que após o dia 17 a água infiltrou com uma taxa de 0,09 m/dia e que após este período o fundo da bacia terá ficado claramente colmatado, o que é visível pela estabilidade dos valores por um período significativo de 5 dias.

Tentou-se compreender o que teria provocado a elevação, de cerca de 12 cm, na altura da água ocorrida entre o dia 16 (15:00h) e o dia 17 (23:00h). Este valor corresponde a um volume adicionado de 9,6 m³ para o intervalo de tempo que totalizou 32 horas. Não havendo entradas de água intencionais para a bacia, no referido período, analisou-se a precipitação ocorrida como uma hipótese a considerar. No local foi instalado um medidor de precipitação que permitiu contabilizar esta variável e assim estimar o volume de água adicionado à bacia, por efeito da precipitação ocorrida no seu interior. Os valores apresentados no Quadro 5.3 permitiram inferir valores muito baixos, da ordem dos 1,5

m³, pouco significativos comparativamente com o volume de água total na bacia. Por outro lado, pode observar-se na Figura 5.8, que nos dois dias em que ocorreu maior precipitação (22 e 23) não se registou qualquer alteração visível na atura da água. Assim, a causa para a elevação do nível da água na bacia, não sendo devida a qualquer entrada de água vinda do exterior, poderá estar relacionada ou com a caída de blocos da paredes da bacia ou com um rearranjo da estrutura sedimentar que terá provocado de alguma forma uma redução da área da bacia, provocando assim uma elevação da água. De assinalar as pequenas oscilações que se verificaram a partir do dia 16, com sinal de um ciclo semi-diurno de 12 em 12 horas. Não se tendo produzido o mesmo sinal nos registos do piezómetro, não se pode estabelecer uma ligação hidráulica, apesar de pouco provável pela distância existente, com o estuário da Ria Formosa.

Quadro 5.3 – Estimativa da precipitação ocorrida na área da bacia de infiltração no Areal Gordo

Dia/mês	Precipitação (mm)	Volume de água adicionado à bacia (L)
17 Fev.	1,26	100,60
18 Fev.	0,88	70,42
20 Fev.	0,88	70,42
22 Fev.	8,80	704,20
23 Fev.	6,29	503,00
Total	18,10 mm	1449 L = 1,5 m ³

(1 mm = 1 L/m²)

A variação da profundidade do nível da água (Figura 5.8) mostra três períodos de subida importantes, evidentemente causados pelo efeito da recarga artificial na bacia. O primeiro, pouco notório, com uma amplitude de variação de apenas 2 cm, e os dois seguintes, mais significativos, que atingiram uma amplitude de variação de 12 e 6 cm, respectivamente. Considerou-se que o primeiro período corresponde à saturação da zona não saturada subjacente à bacia. Designou-se por 1^a e 2^a chegada os dois períodos subsequentes, que correspondem à eventual chegada de uma partícula de água ao piezómetro, traduzido pelo início e o fim da recta de subida do nível de água no piezómetro. A variação de alguns parâmetros de qualidade da água poderá dar uma indicação mais correcta na determinação do momento da chegada de uma partícula de água. Na Figura 5.9 observa-se a evolução de alguns parâmetros físico-químicos, (temperatura, Eh e condutividade eléctrica) e as concentrações de NO₃ registados no piezómetro no mesmo período. Apesar destes resultados serem pouco conclusivos, nota-se uma ligeira subida nos valores de condutividade eléctrica e na concentração de NO₃ no mesmo período identificado como 1^a chegada.

A velocidade de escoamento de uma partícula de água (velocidade de Darcy (V_D) e velocidade intersticial (V_i)) e a condutividade hidráulica (K) do meio saturado foram inferidas pelas duas evidências de chegada de água ao piezómetro (Quadro 5.4). A Figura 5.10 apresenta um esquema com a localização da bacia, do piezómetro e as distâncias utilizadas para os cálculos. A permeabilidade hidráulica calculada assume a zona não saturada abaixo da bacia como saturada durante todo o ensaio. Os valores calculados de V_i , V_D e K para a 1^a chegada foram de 4,35, 1,70 e 1,97 m/d, respectivamente, e para a 2^a chamada de 12,80, 4,99 e 5,94 m/d, respectivamente. Parecem ser mais plausíveis os valores determinados na 1^a chegada para o meio em questão. Os valores da 2^a chegada terão sido sobrestimados pela incerteza na determinação do seu início.

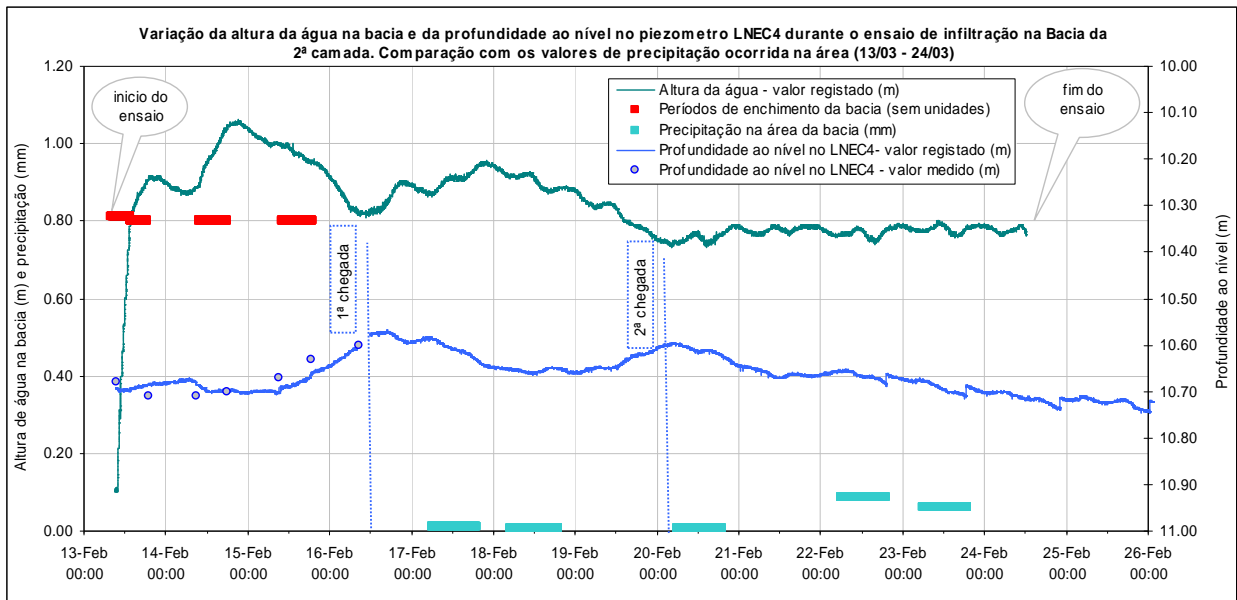


Figura 5.8 – Profundidade ao nível da água no piezômetro LNEC4, durante a realização do ensaio de infiltração na bacia na 2ª camada litológica

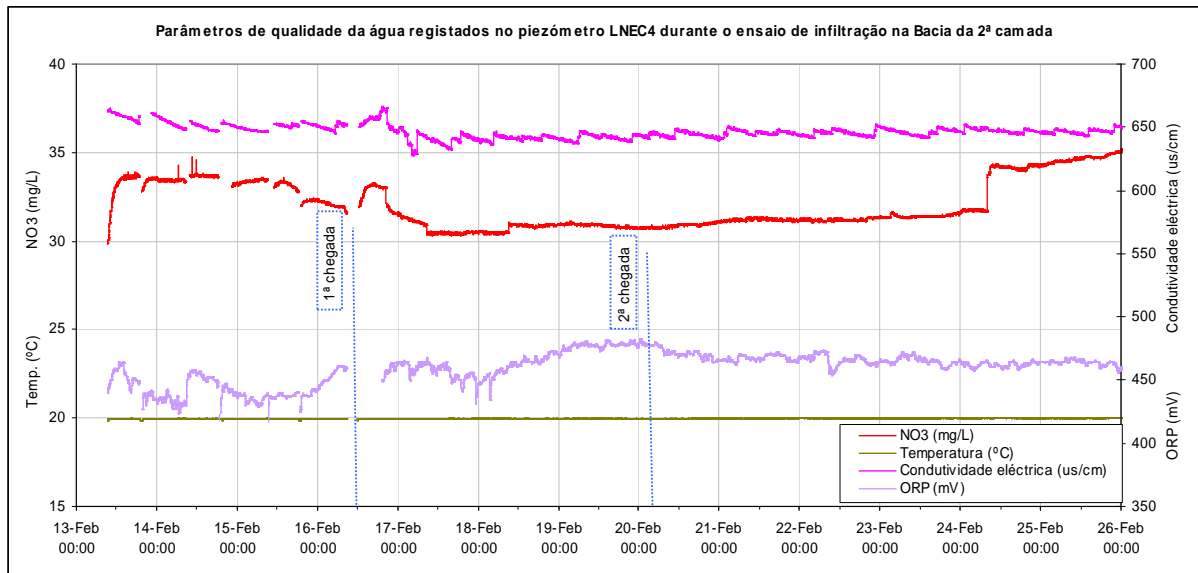


Figura 5.9 – Parâmetros de qualidade da água registados no piezômetro LNEC4, durante a realização do ensaio de infiltração na bacia na 2ª camada litológica

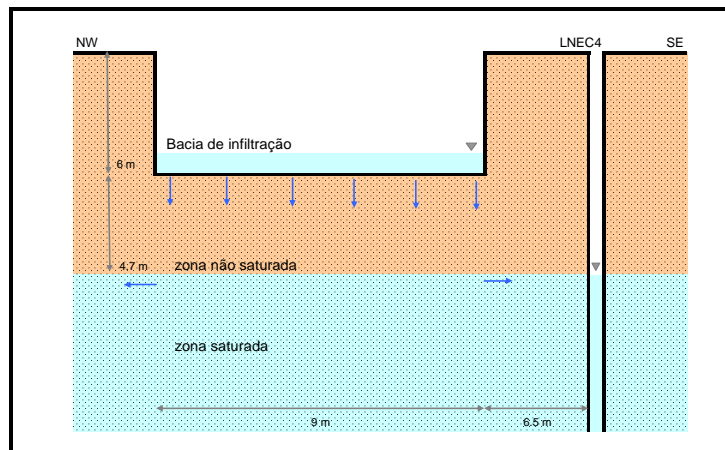


Figura 5.10 – Esquema da bacia de infiltração na 2ª camada litológica e piezômetro

Quadro 5.4 – Estimativa de parâmetros hidráulicos (V_i , V_D e K) a partir da influência da infiltração da água ocorrida na bacia e manifestada por variações da profundidade ao nível no piezómetro mais próximo

	Dia/Hora	ΔT (h)	H1 (m)	H2 (m)	i	V_i (m/d)	V_D (m/d)	K (m/d)
Início 1	13/03 10:00 14/03 09:00	11	10,70 10,68	5,80 5,11	0,75 0,86	Saturação da zona não saturada subjacente à bacia		
1º chegada	15/03 12:00 16/03 19:00	50 81	10,69 10,58	5,01 5,12	0,87 0,84	5,38 3,32	2,10 1,29	2,40 1,54
Início 2	18 13:00	0	10,66	5,09	0,86	-		-
2ª chegada	19/03 03:00 20/03 07:00	14 42	10,65 10,60	5,15 5,25	0,85 0,82	19,20 6,40	7,49 2,50	8,85 3,03
1º chegada – valor médio						4,35	1,70	1,97
2ª chegada – valor médio						12,80	4,99	5,94

V_i – Velocidade intersticial (Distância/Tempo)

V_D – Velocidade de Darcy ($V_D = V_i \times n_e$)

H1 – Profundidade ao nível no piezómetro LNEC4

H2 – Profundidade ao nível na bacia

i – Gradiente hidráulico

K – Condutividade hidráulica ($K = V_D / i$)

n_T – Porosidade das areias castanhas (39%) $\approx n_e$

ΔT – Intervalo de tempo

Distância percorrida por uma partícula de água entre o fundo da bacia e o piezómetro LNEC4 (zona não saturada + zona saturada) = 4,7 + 6,5 = 11,2 m

O nível piezométrico no aquífero retomou a posição inicial, 10 dias após o início do ensaio, existindo ainda cerca de 80 cm de água na bacia, o que é, mais uma vez, uma evidência da colmatação do sistema.

C) Bacia de infiltração na 3ª camada litológica (areias amarelas)

A bacia de infiltração na 3ª camada litológica que corresponde às areias amarelas (com 8 metros de profundidade), ficou com área de fundo de 61,2 m². Nesta bacia foi realizado um ensaio de infiltração *in situ* seguido de um ensaio de traçador. O primeiro permitiu estimar as taxas de infiltração para esta camada litológica e o segundo permitiu inferir sobre os valores de permeabilidade das zonas não saturada e saturada do solo. O procedimento de realização do ensaio de infiltração foi semelhante ao do ensaio anteriormente descrito e o equipamento de monitorização utilizado foi o mesmo. O ensaio teve a duração total de 4 dias, iniciando-se no dia 28/02 às 9h:00m. O enchimento da bacia foi efectuado com um caudal estimado de 14,3 m³/h e demorou 3,43 horas a encher 80 cm. Após o enchimento da bacia procedeu-se, tal como no ensaio anterior, à redução do caudal e instalação de um caudalímetro. Assim, o volume de água adicionado variou em função da altura da água de forma a manter-se um nível constante. O ensaio com reposição de caudal para a bacia teve a duração de 2,4 dias (57 horas). O ensaio só foi dado como terminado quando toda a água na bacia se infiltrou, *i.e.*, a 04/03 às 16h:00m, 4,3 dias (103 horas) após o início do ensaio.

A Figura 5.11 mostra um pormenor da bacia, no início do seu enchimento, e a sonda Troll9500 instalada no seu fundo para registo contínuo do nível da água e medição dos parâmetros de qualidade físico-químicos já referidos.

Ensaio de traçador

O ensaio de traçador iniciou-se no dia 28/02 às 14h:55m. O traçador utilizado foi o cloreto de sódio (NaCl), colocado de forma homogénea em toda a área de bacia e após

se ter estabilizado a altura de água e o caudal introduzido. A sua colocação demorou apenas 5 minutos. A quantidade de NaCl foi calculada de modo a que a concentração de Cl na água da bacia fosse 10 vezes superior ao valor de referência de 110 mg/L de Cl. O volume de água na bacia no início do ensaio era de 58,1 m³ e foi preciso adicionar 100 kg de NaCl para atingir a referida concentração de Cl. A solubilidade do NaCl, de 359 g/L, não constituiu um factor limitativo relativamente à sua completa dissolução na água da bacia porque a quantidade a dissolver era inferior a este valor (1,8 g/L).

A monitorização da zona não saturada do solo durante o ensaio de traçador, foi realizada através da amostragem de água intersticial por 6 cápsulas de *téflon*, instaladas no fundo da bacia em 3 locais (A, B e C) e 2 profundidades cada local (20 cm, 60 cm para as cápsulas A e B e 20 cm e 100 cm para a cápsula C) (Figura 5.12). O traçador utilizado foi facilmente detectado pela medição da condutividade eléctrica nas amostras recolhidas e pelos sensores de condutividade eléctrica e de cloretos instalados nas sondas da bacia e do LNEC4, estando o piezómetro localizado a uma distância de 6,5 m da bacia.

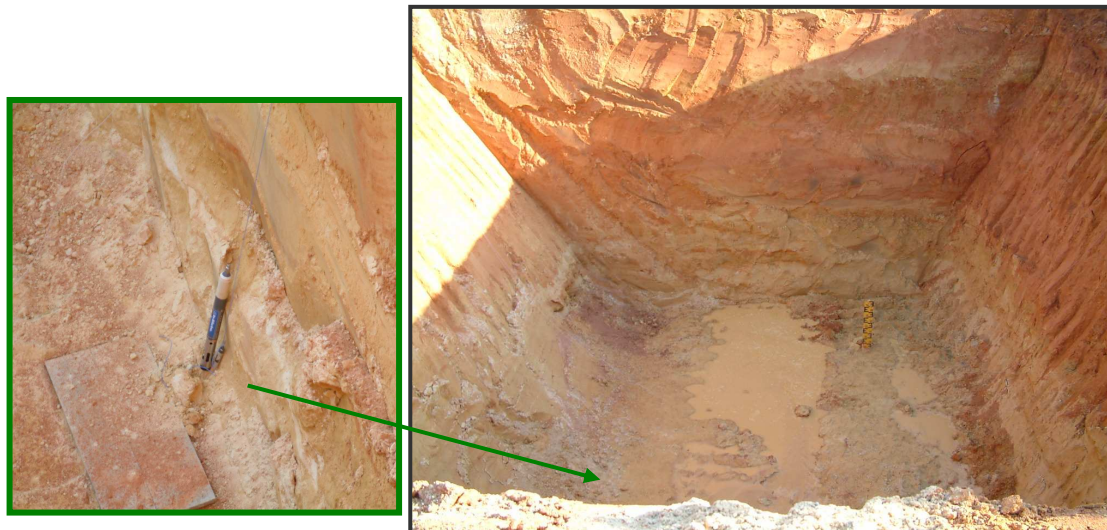


Figura 5.11 – Pormenor da bacia da 3ª camada (início do enchimento) e do equipamento instalado para monitorização do nível da água durante o ensaio

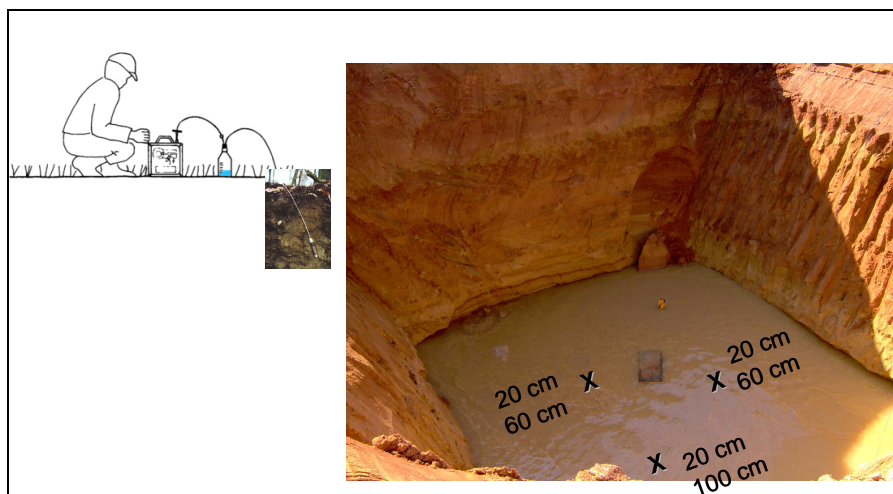


Figura 5.12 – Pormenor da bacia de infiltração na 3ª camada durante o ensaio de traçador e localização das cápsulas instaladas para monitorização da zona não saturada a profundidades de 20 cm, 60 cm e 100 cm (Lobo Ferreira *et al.*, 2007b)

C.1) Análise dos resultados obtidos (quantidade)

O procedimento inicialmente previsto para o ensaio de infiltração consistia em manter um nível de água constante na bacia durante três dias com um metro de altura e registar com um caudalímetro o volume de água descarregado para a bacia. Deste modo, o volume de água adicionado à bacia corresponderia ao volume infiltrado. Os valores inicialmente estimados para as taxas de infiltração foram de 1,52 m/d, para a média, e de 1,59 m/d para a mediana. Na prática, a análise mais rigorosa realizada após o ensaio, revelou alguma dificuldade no acerto destas duas variáveis.

Na Figura 5.13 apresenta-se a variação da altura da água na bacia, obtida pelos valores registados pela sonda e a comparação com os valores medidos *in situ*, juntamente com o caudal estimado adicionado durante o ensaio. As descidas acentuadas de nível revelam uma infiltração significativa e alguma dificuldade em regular os caudais adicionados à bacia, especialmente durante o período da noite.

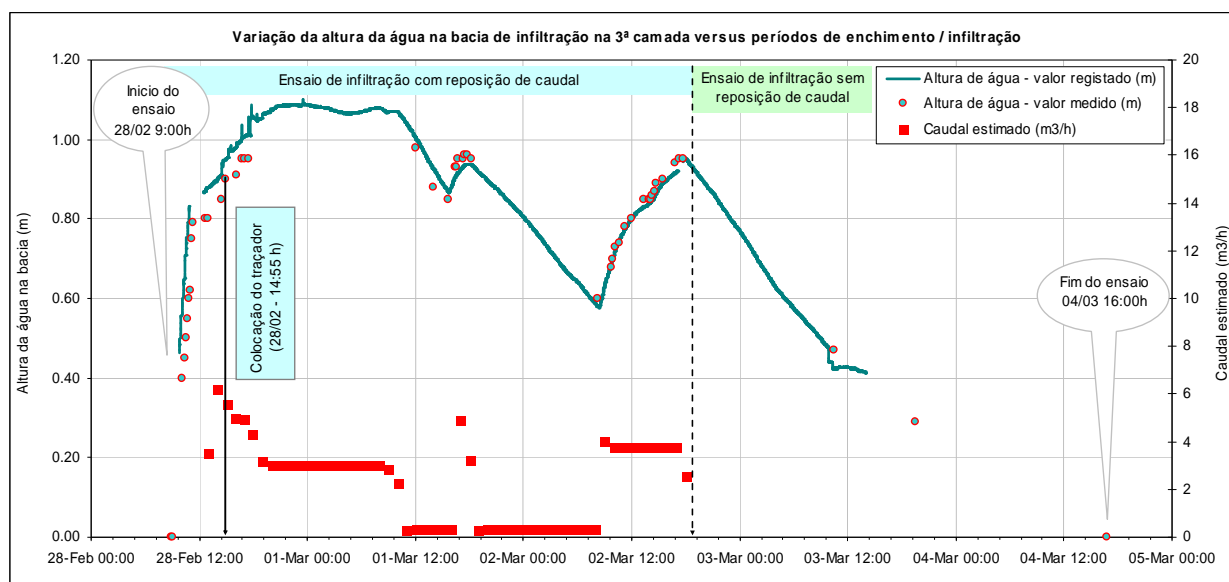


Figura 5.13 - Variação da altura da água na bacia de infiltração na 3ª camada litológica, durante o ensaio de infiltração e de traçador. Comparação com o caudal adicionado à bacia durante o ensaio.

Assim, adoptou-se uma metodologia diferente para interpretação dos resultados obtidos que possibilitou, conforme se pretendia, inferir os valores das taxas de infiltração ocorridas durante o ensaio. Consistiu em subdividir o ensaio global em ensaios parcelares, com o objectivo de determinar para cada período de tempo individualizado o volume de água que se infiltrou na bacia. A avaliação do volume de água infiltrado (V_{inf}) resultou da comparação entre o volume de água que se estimou em função da altura de água na bacia (V_C) e o volume de água real (V_R), adicionado à bacia e registado pelo caudalímetro, para cada intervalo de tempo considerado. A diferença entre estas duas variáveis permitiu inferir sobre o volume de água infiltrado durante cada ensaio parcelar e assim determinar as taxas de infiltração ocorridas. Os ensaios parcelares correspondem a dois tipos distintos: os ensaios de enchimento (que ocorrem quando o caudal colocado na bacia é superior ao volume infiltrado, *i.e.*, 1º, 2º, 5º e 7º Ensaio) e os ensaios de infiltração (que ocorrem quando o caudal colocado na bacia é inferior ao volume infiltrado, *i.e.*, 3º, 4º, 6º, 8º, 9º e 10º Ensaio). Através da variação da altura da água na bacia, para um dado intervalo de tempo, determinou-se o volume de água adicionado

(sinal positivo) ou infiltrado (sinal negativo) na bacia durante cada ensaio parcelar. No caso dos ensaios parcelares de enchimento a variação da altura da água na bacia, entre o início e o fim do ensaio, significa o volume de água adicionado à bacia e a comparação deste valor com o volume de água efectivamente adicionado à bacia, medido através do caudalímetro, fornece uma indicação de qual o volume de água que se terá infiltrado no respectivo intervalo de tempo. No caso dos ensaios parcelares de infiltração, em que o volume de água adicionado à bacia não foi suficiente para manter um nível constante, a variação da altura da água fornece uma indicação do volume de água infiltrado, ao qual se acrescenta o volume adicionado à bacia, isto porque se o nível desce o $V_{inf.} > V_r$ adicionado.

O Quadro 5.5 apresenta estes resultados e os valores calculados para a taxa de infiltração média (durante os períodos de enchimento) de 0,71 m/d, durante os períodos de infiltração, durante o ensaio de 0,97 m/d e após o ensaio ter terminado de 0,51 m/d.

Quadro 5.5 – Parâmetros medidos durante os períodos de infiltração e de enchimento inicial e seguintes. Estimativa do volume de água infiltrado e da taxa de infiltração para cada ensaio de enchimento/infiltração na bacia.

Ref. Ensaio	Tipo de ensaio	Dia/Hora	H inicial/final (m)	ΔH (m)	ΔT (h)	Vc inicial/final (m ³)	Vc infiltrado ou adicionado (m ³)	Vr adicionado (m ³)	Vinf. (m ³)	Taxa de infiltração (m/d)
1º Ensaio	Enchimento s/ contador	28/02 09:00	0	0,8	3,43	0,00	48,96	≈48,96 (b)	n.d.	n.d.
		28/02 12:26	0,8			48,96				
2º Ensaio	Enchimento	28/02 12:26	0,88	0,21	8,90	53,856	12,85	39,60	26,75	1,18
		28/02 21:20	1,09			66,708				
3º Ensaio	Infiltração	28/02 21:20	1,09	-0,02	12,87	66,708	-1,22	38,21	39,43	1,20
		01/03 10:12	1,07			65,484				
4º Ensaio	Infiltração	01/03 10:12	1,07	-0,19	5,68	65,484	-11,63	1,1	12,73	0,88
		01/03 15:53	0,88			53,856				
5º Ensaio	Enchimento	01/03 15:53	0,88	0,07	1,55	53,856	4,28	6,04	1,76	0,44
		01/03 17:20	0,95			58,14				
6º Ensaio	Infiltração	01/03 17:20	0,95	-0,36	15,07	58,14	-22,03	9,50	31,53	0,82
		02/03 08:35	0,59			36,108				
7º Ensaio	Enchimento	02/03 08:35	0,59	0,36	9,08	36,108	22,03	33,54	11,51	0,50
		02/03 17:40	0,95			58,14				
8º Ensaio	Infiltração	02/03 17:40	0,95	-0,48	16,17	58,14	-29,38	0,00	29,38	0,71
		03/03 09:50	0,47			28,764				
9º Ensaio (a)	Infiltração	03/03 10:30	0,47	-0,18	9,00	28,764	-11,02	0,00	11,02	0,48
		03/03 19:30	0,29			17,748				
10º Ensaio (a)	Infiltração	03/03 19:30	0,29	-0,29	21,25	17,748	-17,75	0,00	17,75	0,33
		04/03 16:45	0,00			0				
TOTAL (registado no caudalímetro)								128		
MÉDIA (durante os períodos de enchimento)									0,71	
MÉDIA (durante os períodos de infiltração durante o ensaio)									0,97	
MÉDIA (após o ensaio)									0,51	

H (m) – Altura de água na bacia

ΔH (m) – Variação da altura de água na bacia

ΔT (h) – Intervalo de tempo

Vc (m³) – Volume de água calculado com base na variação da altura da água (sinal positivo para volume adicionado; sinal negativo para volume infiltrado)

Vr (m³) – Volume de água registado no caudalímetro

Vinf. (m³) – Volume de água infiltrado

(a) Estes ensaios correspondem a leituras observadas na bacia, após terminado o ensaio,

(b) Valor estimado com base em leituras no local sem contagem pelo caudalímetro. Valor idêntico ao volume de água calculado, mas que não permitiu inferir sobre uma eventual infiltração de água durante o período de enchimento inicial de 3,4 horas.

A análise dos valores das taxas de infiltração calculadas durante os ensaios de enchimento e de infiltração, mostram alguma variabilidade no tempo (Figura 5.14). As taxas de infiltração seguem uma tendência de descida ao longo do ensaio, que se podem relacionar com o início da colmatção do fundo da bacia por materiais finos, provenientes da fracção fina das areias amarelas que passam para a solução aquosa e se depositam no fundo. Os dois últimos ensaios, Ensaio 9 e Ensaio 10 correspondem a taxas de infiltração determinadas após o ensaio a caudal constante ter terminado, pelo que, parece aqui existir alguma correlação entre a taxa de infiltração e a altura da água na bacia, que exercerá maior pressão quanto mais elevado for o seu valor.

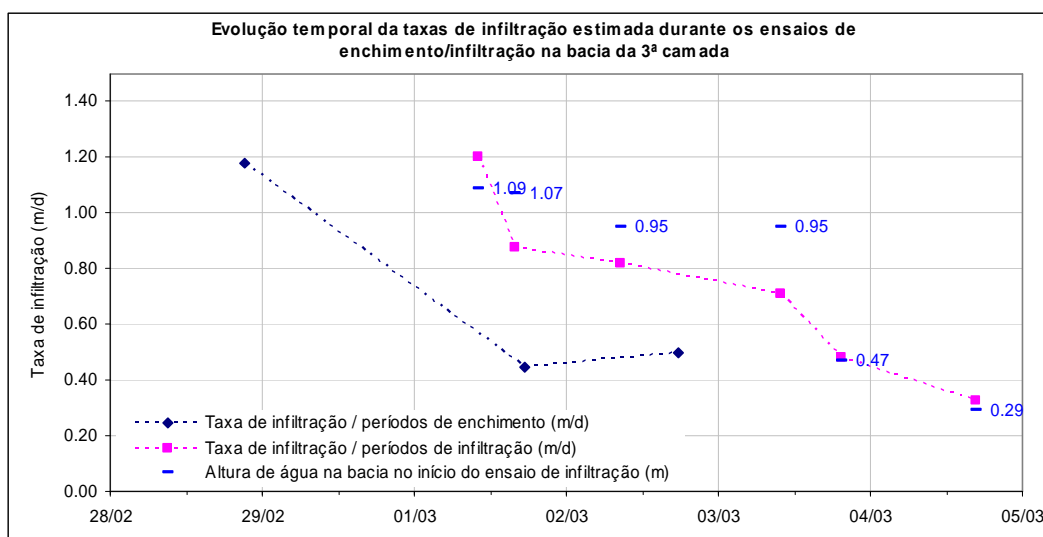


Figura 5.14 – Evolução temporal das taxas de infiltração estimada durante os ensaios de enchimento/infiltração na bacia da 3ª camada

C.2) Análises dos resultados obtidos no piezómetro LNEC4

A Figura 5.15 mostra a evolução temporal da profundidade da água no piezómetro mais próximo, LNEC4, monitorizada desde o início do ensaio até à reposição do nível inicial. É bem visível a influência que a infiltração da água na bacia provoca na altura do nível piezométrico, que ocorre ainda no primeiro dia do ensaio e se prolonga durante todo o tempo em que este decorre a caudal constante. Quando o ensaio termina, mesmo ainda existindo água na bacia, o nível parece estabilizar e depois descer, o que pode ser efeito dos valores mais baixos das taxas de infiltração calculadas (respectivamente para os Ensaios 9 e 10, cf. Quadro 5.5). O retorno ao valor inicial ocorre de forma mais lenta. O momento exacto, tanto quanto a incerteza dos processos e a heterogeneidade no meio nos permite determinar, da chegada de uma partícula de água desde a bacia até ao piezómetro só pode ser determinado com o auxílio do ensaio de traçador, conforme se irá demonstrar de seguida.

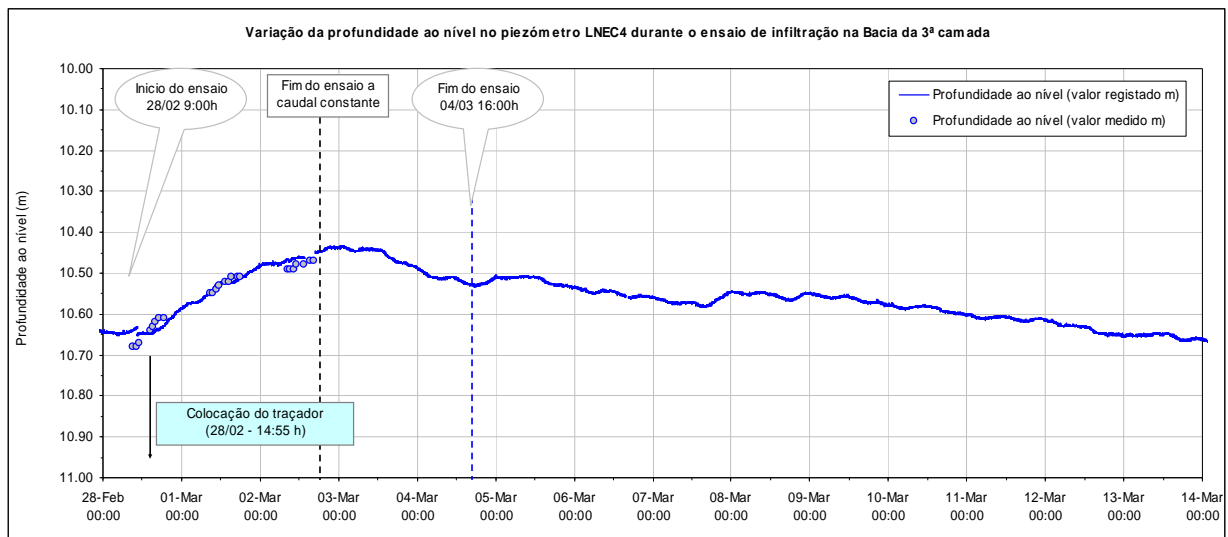


Figura 5.15 – Variação da profundidade ao nível no piezómetro LNEC4 durante o ensaio de infiltração na bacia da 3ª camada

C.3) Análises dos resultados obtidos no ensaio de traçador

A Figura 5.16 mostra a variação observada nos valores de condutividade eléctrica e da concentração de Cl registados na sonda colocada no fundo da bacia. O período de tempo entre a colocação do traçador à superfície da água e o começo da sua detecção, corresponde ao tempo que este demorou a percorrer uma altura de água de 0,90 m. Os valores máximos registados para a condutividade eléctrica e a concentração de Cl foram de 6958 $\mu\text{s}/\text{cm}$ e 53 480 mg/L, respectivamente. Ambos os parâmetros retomam o valor inicial após 3 horas desde o começo da sua detecção.

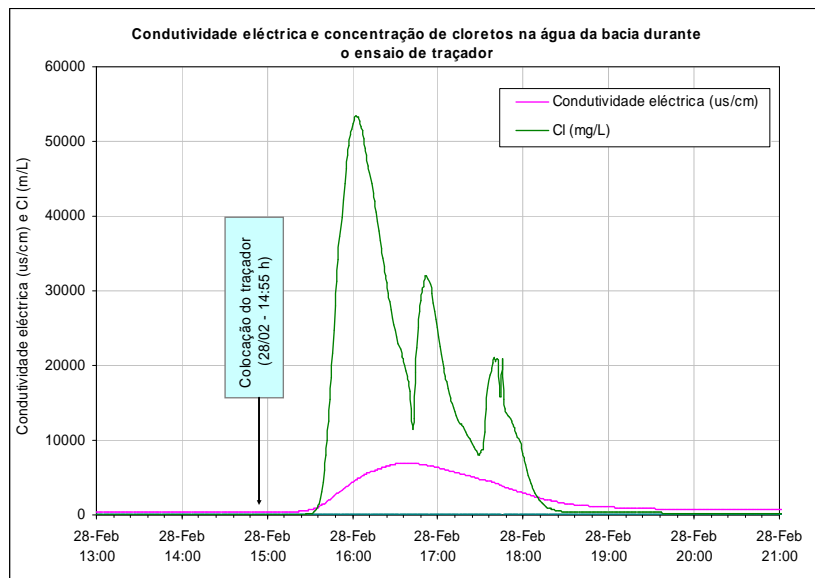


Figura 5.16 – Variação da condutividade eléctrica e da concentração de cloretos na água da bacia durante o ensaio de traçador

Na Figura 5.17 e na Figura 5.18 pode observar-se a variação da condutividade eléctrica medida em cada amostra de água recolhida no intervalo de tempo assinalado. A cápsula A60 cm não permitiu a recolha de qualquer amostra de água, possivelmente devido ao tubo de ligação se ter desprendido. Verifica-se que os valores mais elevados, considerados como o pico da chegada do traçador, se detectaram em intervalos de tempo consecutivos em dois grupos de cápsulas: entre as 18h:00 (28/02) e as 8h:30

(01/03), para as cápsulas B20 cm, C20 cm e B60 cm e entre as 8h:30 e as 11h:00 (01/03), para as cápsulas A20 cm e C100 cm. O intervalo de tempo de amostragem para o primeiro grupo foi demasiado alargado o que dificultou a identificação precisa da hora de chegada do traçador. No entanto, o mesmo não sucedeu no segundo grupo, o que possibilitou calcular de forma mais precisa a chegada do traçador e inferir sobre a velocidade intersticial.

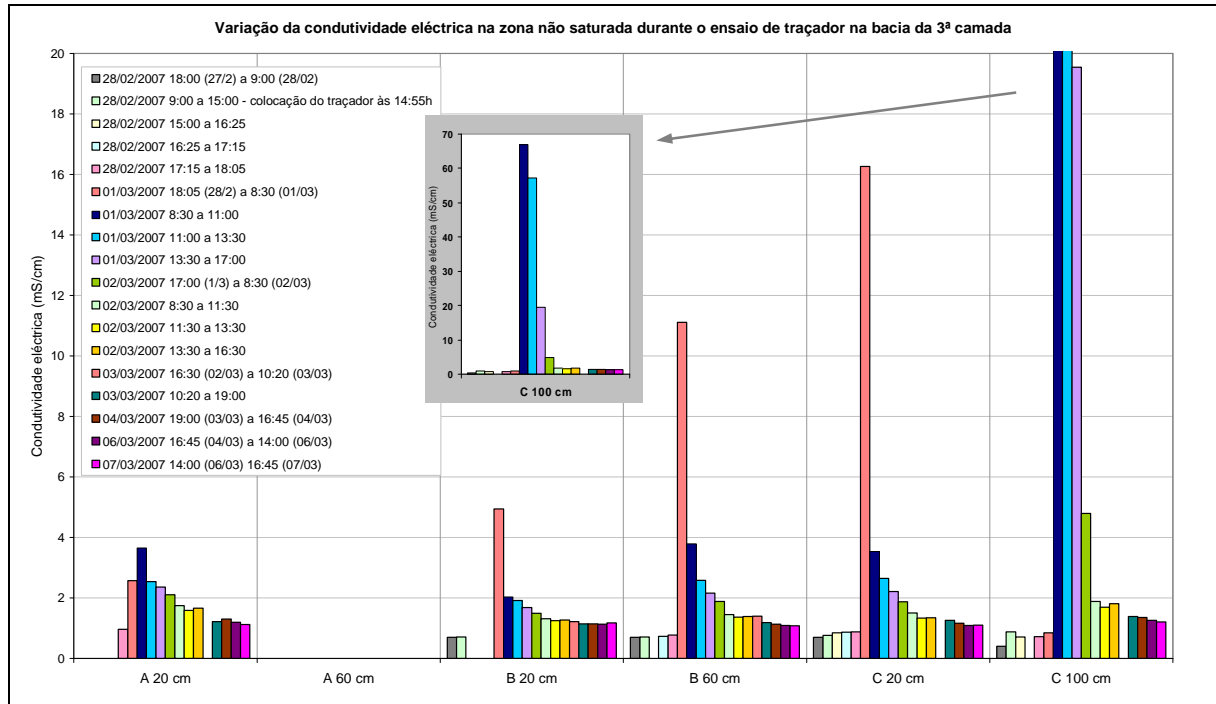


Figura 5.17 – Variação da condutividade eléctrica na zona não saturada durante o ensaio de traçador na bacia de infiltração da 3ª camada (Lobo Ferreira *et al.*, 2007b)

O Quadro 5.6 apresenta os valores mínimo e máximo e a mediana da velocidade estimada para as cápsulas C100 cm e A20 cm, para o intervalo de tempo, compreendido entre 17,5 a 20 horas desde o início do ensaio. Com base nos valores da mediana foram calculados os tempos de chegada possíveis para as cápsulas B20 cm, C20 cm e B60 cm, obtendo-se valores plausíveis apenas com uma V_i de 1,28 m/d. Este foi o valor considerado como característico das areias amarelas. Aplicando a Eq. 2.2 e a Eq. 2.4 determinou-se a V_D em 0,45 m/d considerando $n \approx n_e$ (0,35) e K em 0,45 m/d, considerando um gradiente hidráulico de 1. Considerou-se a zona não saturada subjacente à bacia como saturada durante o ensaio e por este motivo válidas as expressões referidas.

Quadro 5.6 – Estimativa da velocidade intersticial na zona não saturada, sob a bacia de infiltração, através dos resultados do ensaio de traçador

Cápsula	Intervalo de tempo	Horas	Velocidade intersticial (m/d)		
			Mínimo	Máximo	Mediana
C 100 cm	8:30 - 11:00 01/03	17,5 - 20	1,37	1,20	1,28
A 20 cm	8:30 - 11:00 01/03	17,5 - 20	0,27	0,24	0,26
			Horas calculadas se $V_i = 1,28$ m/d		Horas calculadas se $V_i = 0,26$ m/d
B 20 cm/ C 20 cm	18:05 28/02 - 8:30 01/03	3 - 17,5	3,8 horas		18,5 horas
B 60 cm	18:05 28/02 - 8:30 01/03	3 - 17,5	11,3 horas		55,4 horas

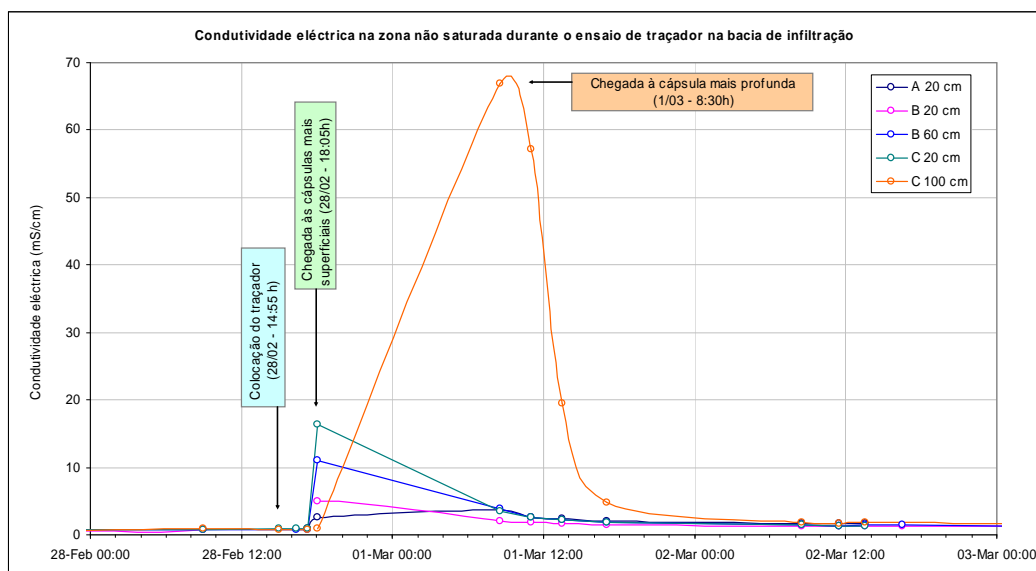


Figura 5.18 – Variação da condutividade eléctrica observada ao longo do tempo, na zona não saturada durante o ensaio de traçador

Outro aspecto que se assinala consiste na chegada do traçador em dois tempos diferentes mas consecutivos em dois locais diferentes, à mesma profundidade (20 cm). Deverá ser um indício da heterogeneidade do meio e/ou na distribuição espacial da salinidade da água da bacia. Em relação a este último aspecto, o local correspondente à instalação da cápsula C parece ser a zona mais salinizada da bacia, com 67 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de condutividade eléctrica registada na água intersticial amostrada a cerca de 1 metro de profundidade. Contudo, este valor é muito superior ao valor máximo registado na água da bacia (6958 $\mu\text{S}/\text{cm}$), o que se atribuiu ao facto de serem dois tipos distintos de aparelhos de medição, uma sonda com sensor de condutividade e um aparelho de medição instantânea. Considerou-se mais credível o valor de medição instantânea pelo facto do sensor não ter sido calibrado para valores tão elevados.

Os parâmetros físico-químicos pH, temperatura, Eh, condutividade eléctrica e as concentrações de Cl e NO₃, foram monitorizados no piezómetro LNEC4, com intervalos de um minuto. Na Figura 5.19 apresentam-se os resultados dos parâmetros cuja variação parece estar relacionada com o ensaio de infiltração e de traçador. Na Figura 5.20 seleccionaram-se a condutividade eléctrica e a concentração de Cl para determinar a chegada do traçador ao piezómetro. Foi possível identificar duas eventuais chegadas, a primeira ainda durante a influência do ensaio às 14h:30 do dia 02/03 (47,5 horas após o início do ensaio de traçador) e a segunda, menos perceptível, após terminado o ensaio, às 22h:00 do dia 06/03 (54 horas depois de terminado o ensaio). A distância percorrida por uma partícula de água desde a sua infiltração no meio subterrâneo, percurso vertical por efeito da gravidade até à zona saturada, adicionando o percurso no meio saturado até ao piezómetro, totalizou 9,15 m (2,65+6,5m) para a 1ª chegada e 9,03 m (2,53+6,5m) para a 2ª chegada. Os parâmetros hidráulicos V_i , V_D e K foram estimados com base nas duas possíveis chegadas do traçador (Quadro 5.7): para a 1ª chegada calcularam-se 4,53, 1,59 e 3,09 m/dia, respectivamente e para a 2ª 4,03, 1,41 e 6,41 m/d, respectivamente. As velocidades calculadas na 2ª chegada representam um valor mais aproximado do escoamento natural, sem a perturbação causada pelo próprio ensaio de infiltração.

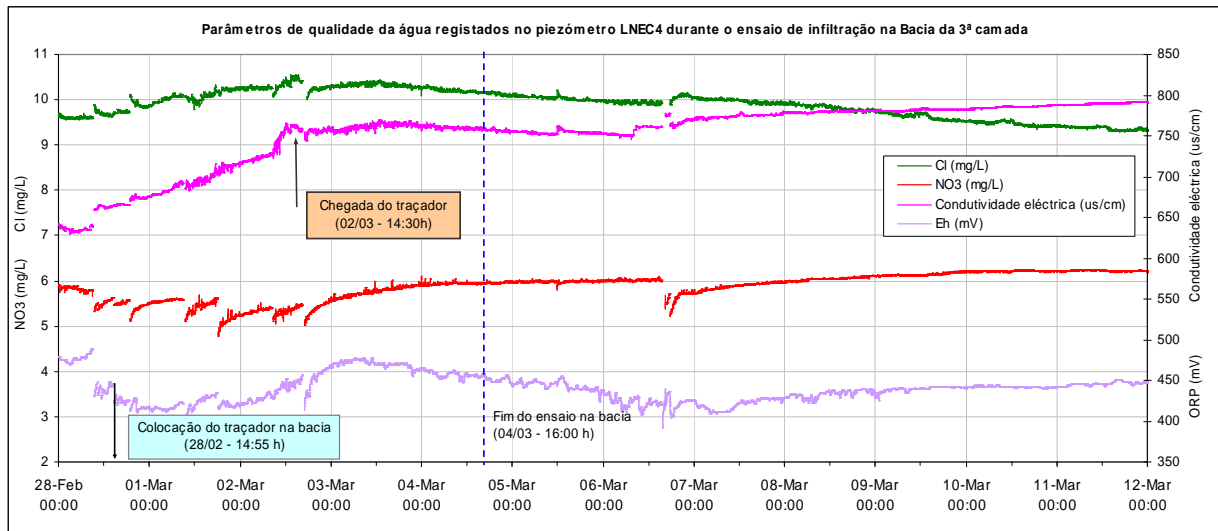


Figura 5.19 – Parâmetros de qualidade da água observados no piezómetro LNEC4 durante o ensaio de infiltração e de traçador na bacia da 3ª camada

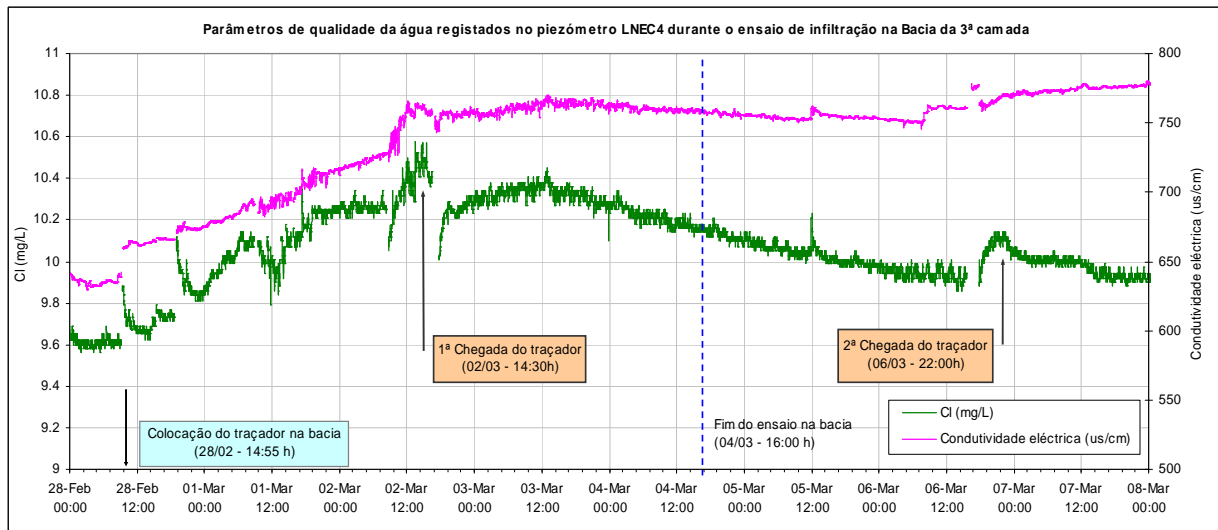


Figura 5.20 – Variação da condutividade eléctrica e da concentração de cloretos observada no piezómetro LNEC4 durante o ensaio de infiltração e de traçador na bacia da 3ª camada

Quadro 5.7 – Estimativa de parâmetros hidráulicos (V_D , V_i e K) a partir da detecção da chegada do traçador ao piezómetro mais próximo

	Dia/Hora	ΔT (h)	H1 (m)	H2 (m)	i	V_i (m/d)	V_D (m/d)	K (m/d)
Início 1	28/02 15:00	0	10,64	10,63	0 ^{a)}	Saturação da zona não saturada subjacente à bacia		
1ª chegada	02/03 14:30	47,5	10,47	7,13	0,51	4,53	1,59	3,09
Início 2	04/03 16:00	0	10,53	8 - 10,53	0,39-0	Após infiltração de toda a água da bacia		
2ª chegada	06/03 22:00	54	10,56	9,13 ^{b)}	0,22	4,03	1,41	6,41

V_i – Velocidade intersticial (Distância/Tempo)

V_D – Velocidade de Darcy ($V_D = V_i \times n_e$)

H1 – Profundidade ao nível no piezómetro LNEC4

H2 – Profundidade ao nível na zona subjacente à bacia

i – Gradiente hidráulico

K – Condutividade hidráulica ($K = V_D / i$)

n_T – Porosidade total das areias amarelas (35%) $\approx n_e$

ΔT – Intervalo de tempo

Distância percorrida por uma partícula de água entre o fundo da bacia e o piezómetro LNEC4 (zona não saturada + zona saturada) = 2,47 + 6,5 = 8,97 m (1ª chegada) e 2,56 + 6,5 = 9,06 m (2ª chegada)

^{a)} No início do ensaio o gradiente é nulo porque não existe água na bacia

^{b)} Após terminado o ensaio toda a água se infiltrou mas desconhece-se a posição exacta do nível na zona subjacente à bacia. Se a taxa de infiltração é de 0,5 m/d em 54 horas o nível desceu 1,13 m, logo a profundidade ao nível é 9,13m (8+1,13).

5.3.2 Ensaios de injeção

Na zona do Areal Gordo, a cerca de 800 metros a Norte do local de implantação das bacias, procedeu-se à realização de dois ensaios de injeção, um num poço de grande diâmetro ($d=5$ m) e o outro num furo de médio diâmetro (designado por LNEC6, $d=0,5$ m). A formação aflorante neste local são as areias e cascalheiras de Faro-Quarteira. A Figura 5.21 mostra o mapa com a localização do local onde se realizaram os ensaios de injeção

Foi construído um piezómetro (LNEC5), aberto no aquífero freático e com uma profundidade de 30 m, localizado a 15 m a NW do poço, destinado à monitorização contínua do nível piezométrico e parâmetros físico-químicos e de qualidade da água durante e após o ensaio. A caracterização das amostras de solos recolhidas durante a perfuração deste piezómetro permitiu separar aos 6 metros de profundidade duas formações litológicas distintas: as areias vermelhas e as areias amarelas. O furo LNEC6 situa-se a 40 m para Sul deste piezómetro e tem uma profundidade de 28 m.

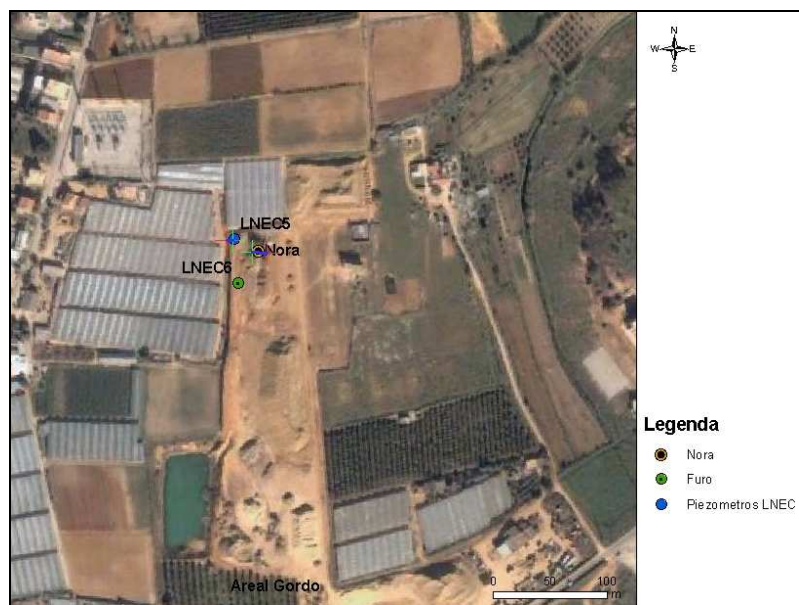


Figura 5.21 - Localização da área de realização dos ensaios de injeção no poço e no LNEC6 e piezómetro de monitorização LNEC5 no Areal Gordo (mapa retirado do Google Earth)

5.3.2.1 Objectivos e metodologia

O principal objectivo consistiu na determinação de taxas de infiltração *versus* a altura de água no poço, através de ensaios de injeção, correspondentes às camadas litológicas do aquífero superficial e inferir sobre a viabilidade de implementação deste tipo de metodologia para a recarga artificial do aquífero. Esta informação foi complementada com determinações laboratoriais da porosidade, peso específico e classificação textural, tendo os resultados obtidos sido apresentados e analisados no Capítulo 4.

5.3.2.2 Descrição dos ensaios e resultados obtidos

A) Injeção num poço de grande diâmetro (nora)

Foram realizados três ensaios de injeção no poço de grande diâmetro, em Março de 2007, nomeadamente: o 1º ensaio iniciou-se no dia 05/03 às 15h:40 e teve a duração de cerca de 4 horas; o 2º ensaio iniciou-se no dia 06/03 às 9h:00 e teve a duração de 9

horas; o 3º ensaio teve início no dia 12/03 às 17h:00 e duração de cerca de 50 horas. A água de recarga era proveniente do mesmo furo utilizado nos ensaios anteriores e o caudal de injeção permaneceu constante, com um valor de cerca de 20 m³/h. As principais características do poço, que está perfurado no aquífero arenoso superficial, são as seguintes:

- Área do fundo, com diâmetro de 5 m = 19,625 m²
- Profundidade do nível de água antes do ensaio = 19,85 m
- Volume total disponível para o ensaio = 390 m³ (área do poço × altura de água)
- Profundidade = 24 m

O equipamento de monitorização consistiu numa sonda multiparamétrica instalada no poço e outra no piezómetro LNEC5, equipadas com sensores para registo com intervalos de um minuto do nível piezométrico, parâmetros físico-químicos da água (temperatura, pH, condutividade eléctrica, oxigénio dissolvido e concentrações de NO₃ e Cl). Complementarmente a profundidade do nível foi medida com uma sonda de registo manual para controlo dos níveis durante os ensaios. A Figura 5.22 mostra alguns pormenores do poço onde foi realizado o ensaio de injeção.



Figura 5.22 – Algumas fotografias do poço de grande diâmetro, onde foi realizado o ensaio de injeção, durante instalação do equipamento de monitorização, no início do ensaio e quando o nível piezométrico estabilizou muito próximo da superfície, no final do 3º ensaio (Lobo Ferreira et al., 2007b)

A.1) Análise dos resultados obtidos (quantidade - poço)

As taxas de infiltração foram calculadas com base na variação da altura da água no poço durante os períodos de não injeção. Foram ainda estimadas durante os períodos de injeção de água, assumindo que o caudal de injeção se manteve fixo nos 20 m³/h e que, apesar de estar a ser injectada água, a componente de infiltração se mantém durante estes períodos. A Figura 5.23 apresenta a variação da profundidade ao nível da água registada no poço.

O Quadro 5.8 resume os parâmetros necessários para estimar as taxas de infiltração e apresenta os valores determinados. Designaram-se por ensaios de enchimento os períodos durante os quais decorreu a injeção de água, já referidos anteriormente como 1º, 2º e 3º ensaios. Os ensaios designados como 4º, 5º e 6º ensaios referem-se aos períodos durante os quais se interrompeu a injeção de água e conseqüentemente a água se infiltrou de forma natural. Os valores estimados para as taxas de infiltração correspondentes aos ensaios de enchimento são de 9,73, 5,57 e 17,98 m/d, respectivamente para o 1º, 2º e 3º ensaios. A discrepância verificada entre estes valores e os determinados durante os ensaios de infiltração, que se falará de seguida, sugere que o caudal de injeção poderá porventura estar sobrestimado, especialmente nos dois

primeiros ensaios, devido ao facto de, no início do ensaio não ser imediata a estabilização do caudal. Este aspecto deixa de ser relevante quanto maior for a duração do ensaio. Os valores calculados para as taxas de infiltração relativas aos 4º, 5º e 6º ensaios de infiltração permitiram comprovar que, a taxa de infiltração se relaciona positivamente com a altura da água (ou carga hidráulica¹). Assim, não faz sentido calcular valores médios quando os períodos de infiltração são longos e a variabilidade da altura da água elevada. Por este motivo os valores calculados para o 5º e 6º ensaios foram decompostos em dias e, no caso deste último, o primeiro dia foi ainda decomposto em horas devido à elevada variabilidade do nível de água. Deste modo, faz mais sentido falar em valores máximos e mínimos de taxas de infiltração obtidos para cada ensaio, associados a uma determinada altura de água, nomeadamente:

- 4º ensaio - 0,27 m/d com 3 m de carga hidráulica;
- 5º ensaio - 0,45 a 3,21 m/d com carga hidráulica de 2,75 a 9,88 m;
- 6º ensaio - 0,02 m/d a 21,5 m/d com carga hidráulica de 1,20 a 16,19 m.

De salientar a estabilização do nível de água no poço, aos 3,66 metros, no último ensaio, ou seja, muito próximo da superfície do solo e com uma carga hidráulica de 16,19 m, por um período de tempo com uma duração significativa (10 horas). Assumindo caudal de injeção de 20 m³/h, a taxa de infiltração calculada é de 24,5 m/d. Este foi o valor máximo calculado no ensaio poço para a taxa de infiltração, indicando que cerca de 480 m³/d correspondem ao volume máximo de água que poderia ser incorporado no aquífero (com 16 m de carga hidráulica).

Na Figura 5.24 estão desenhadas as três curvas de infiltração obtidas nos ensaios do poço e as respectivas cargas hidráulicas no início de cada ensaio.

A Figura 5.25 mostra a taxa de infiltração calculada durante o 3º ensaio de infiltração e a sua evolução no tempo; pode-se observar a importância da carga hidráulica nas taxas mais elevadas, especialmente durante o 1º dia do ensaio. A conjugação das duas Figuras mostra, por exemplo, que as taxas de infiltração são inferiores a 2 m/d quando a carga hidráulica é inferior a 6 m.

A curva apresentada na Figura 5.26 pretende estabelecer uma correlação entre a taxa de infiltração e a carga hidráulica com os valores obtidos no último ensaio de infiltração, através de uma linha de tendência de potência, que explica o ajuste dos dados com um coeficiente de regressão elevado (98,8%). A equação da linha curva que se ajusta aos dados é a seguinte: $Y=0,0144 \times X^{2,6252}$. A aplicação desta expressão poderá permitir o cálculo de valores de taxas de infiltração esperadas, em poços de grande diâmetro, em função do nível de água medido e da carga hidráulica determinada.

¹ Carga hidráulica corresponde à diferença entre o nível inicial, antes do primeiro ensaio de injeção e o nível actual.

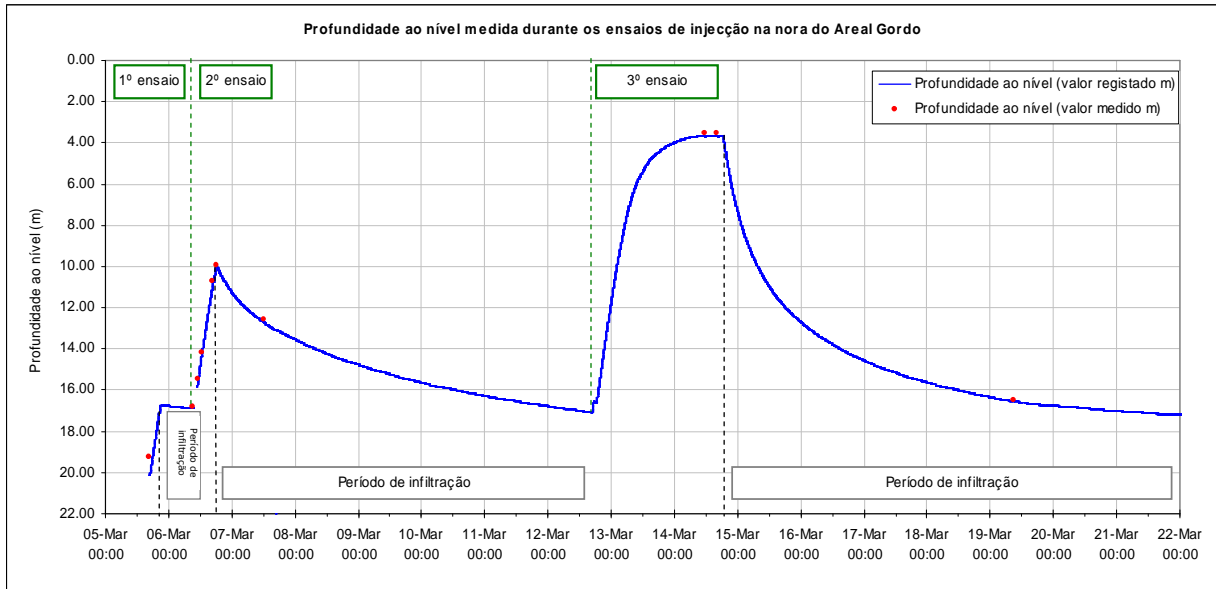


Figura 5.23 – Variação da profundidade ao nível registada no poço durante os ensaios de injeção (Lobo Ferreira *et al.*, 2007b)

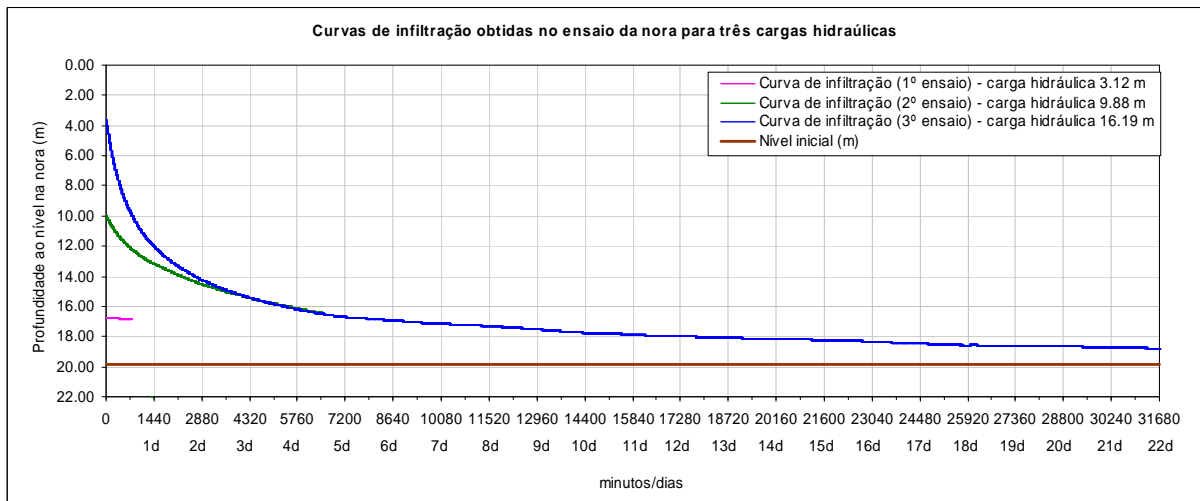


Figura 5.24 – Curvas de infiltração obtidas no ensaio do poço para três cargas hidráulicas

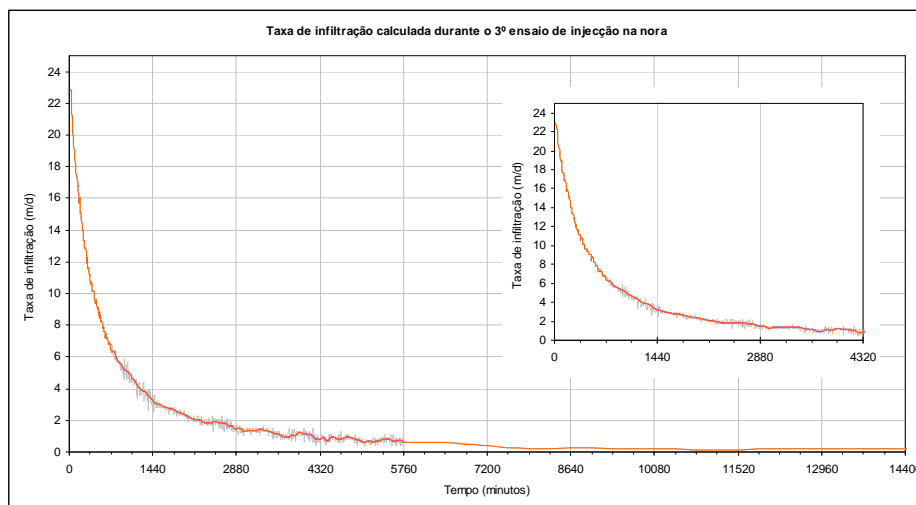


Figura 5.25 – Taxa de infiltração calculada durante o 3º ensaio de injeção no poço

Quadro 5.8 - Parâmetros medidos durante os períodos enchimento e de infiltração. Estimativa do volume de água infiltrado e da taxa de infiltração para cada ensaio de enchimento e infiltração

Ref. Ensaio	Tipo de ensaio	Dia/Hora	H inicial/final (m)	ΔH (m)	ΔT (h)	Vc infiltrado ou adicionado (m³)	Vr adicionado (m³)	Vinf. (m³)	Taxa de infiltração (m/d)*
1º Ensaio	Enchimento	05/03 15:40 05/03 20:45	19,85 16,73	3,12	5,08	61,23	101,67	40,44	9,73
2º Ensaio	Enchimento	06/03 09:18 06/03 18:04	16,87 9,97	6,9	8,77	135,41	175,32	39,91	5,57
3º Ensaio	Enchimento	12/03 16:43 14/03 18:30	17,1 3,66	13,44	49,78	263,76	995,67	731,91	17,98
4º Ensaio	Infiltração	05/03 20:45 06/03 09:18	16,73 16,87	0,14	12,55	2,75	0,00	2,75	0,27
5º Ensaio	Infiltração	06/03 18:04 12/03 16:43	9,97 17,1	7,13	142,65	139,93	0,00	139,93	1,20 (3,21-0,45)
5º Ensaio decomposto por dias	1ºdia	07/03 18:04		3,21	24	62,97		62,97	3,21
	2ºdia	08/03 18:04		1,37	24	26,80		26,80	1,37
	3ºdia	09/03 18:04		0,92	24	18,01		18,01	0,92
	4ºdia	10/03 18:04		0,68	24	13,37		13,37	0,68
	5ºdia	11/03 18:04		0,53	24	10,38		10,38	0,53
	6ºdia	12/03 16:43		0,42	24	8,32		8,32	0,45
6º Ensaio	Infiltração	14/03 18:30 03/04 18:30	3,66 18,65	14,99	480	294,18	0,00	294,18	21,5 - 0,02
6º Ensaio de infiltração decomposto pelas primeiras 24 horas	1ºhora	14/03 19:30		0,90	1	17,58		17,58	21,50
	2ºhora	14/03 20:30		0,78	1	15,33		15,33	18,75
	3ºhora	14/03 21:30		0,68	1	13,43		13,43	16,42
	4ºhora	14/03 22:30		0,60	1	11,87		11,87	14,51
	5ºhora	14/03 23:30		0,53	1	10,43		10,43	12,76
	6ºhora	15/03 00:30		0,48	1	9,37		9,37	11,46
	7ºhora	15/03 01:30		0,43	1	8,46		8,46	10,34
	8ºhora	15/03 02:30		0,40	1	7,78		7,78	9,52
	9ºhora	15/03 03:30		0,36	1	7,15		7,15	8,74
	10ºhora	15/03 04:30		0,33	1	6,50		6,50	7,95
	11ºhora	15/03 05:30		0,30	1	5,97		5,97	7,31
	12ºhora	15/03 06:30		0,28	1	5,56		5,56	6,80
	13ºhora	15/03 07:30		0,26	1	5,13		5,13	6,28
	14ºhora	15/03 08:30		0,24	1	4,72		4,72	5,77
	15ºhora	15/03 09:30		0,23	1	4,54		4,54	5,55
	16ºhora	15/03 10:30		0,21	1	4,18		4,18	5,11
	17ºhora	15/03 11:30		0,21	1	4,04		4,04	4,94
	18ºhora	15/03 12:30		0,20	1	3,90		3,90	4,78
	19ºhora	15/03 13:30		0,18	1	3,60		3,60	4,40
	20ºhora	14/03 14:30		0,17	1	3,41		3,41	4,17
	21ºhora	15/03 15:30		0,16	1	3,15		3,15	3,85
	22ºhora	15/03 16:30		0,16	1	3,08		3,08	3,76
	23ºhora	15/03 17:30		0,14	1	2,83		2,83	3,46
	24ºhora	15/03 18:30		0,14	1	2,70		2,70	3,31
6º Ensaio de infiltração decomposto nos primeiros 20 dias	1ºdia	15/03 18:30		8,39	24	164,71		164,71	8,39
	2ºdia	16/03 18:30		2,20	24	43,16		43,16	2,20
	3ºdia	17/03 18:30		1,18	24	23,25		23,25	1,18
	4ºdia	18/03 18:30		0,77	24	15,15		15,15	0,77
	5ºdia	19/03 18:30		0,50	24	9,77		9,77	0,50
	6ºdia	20/03 18:30		0,26	24	5,01		5,01	0,26
	7ºdia	21/03 18:30		0,21	24	4,08		4,08	0,21
	8ºdia	22/03 18:30		0,14	24	2,76		2,76	0,14
	9ºdia	23/03 18:30		0,23	24	4,58		4,58	0,23
	10ºdia	24/03 18:30		0,20	24	4,00		4,00	0,20
	11ºdia	25/03 18:30		0,13	24	2,64		2,64	0,13
	12ºdia	26/03 18:30		0,12	24	2,43		2,43	0,12
	13ºdia	27/03 18:30		0,08	24	1,49		1,49	0,08
	14ºdia	28/03 18:30		0,11	24	2,08		2,08	0,11
	15ºdia	29/03 18:30		0,05	24	0,91		0,91	0,05
	16ºdia	30/03 18:30		0,10	24	2,03		2,03	0,10
	17ºdia	31/03 18:30		0,14	24	2,79		2,79	0,14
	18ºdia	01/04 18:30		0,10	24	2,04		2,04	0,10
	19ºdia	02/04 18:30		0,02	24	0,30		0,30	0,02
	20ºdia	03/04 18:30		0,05	24	1,03		1,03	0,05

H (m) – Profundidade ao nível no poço

ΔH (m) – Variação da profundidade ao nível de água no poço

ΔT (h) – Intervalo de tempo

Vc (m³) – Volume de água calculado com base na variação da altura da água

Vr (m³) – Volume de água injectado no poço, assumindo um caudal constante de 20 m³/h, para o referido intervalo de tempo

Vinf. (m³) – Volume de água infiltrado no poço

(*) As taxas de infiltração calcularam-se dividindo o volume infiltrado pelo tempo e depois pela área do fundo do poço.

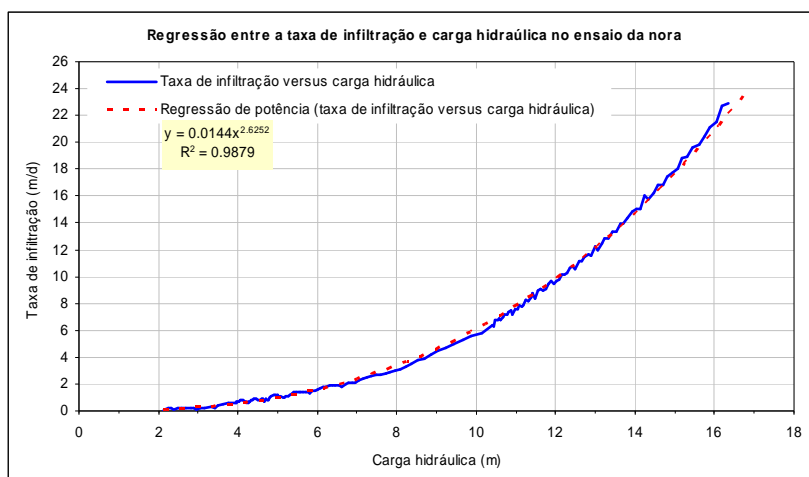


Figura 5.26 – Regressão entre a taxa de infiltração e a carga hidráulica no último ensaio do poço

A.2) Análise dos resultados obtidos no piezómetro LNEC5

A monitorização realizada no LNEC5 permitiu avaliar a evolução da profundidade ao nível da água num piezómetro próximo e inferir sobre a influência que a injeção de água terá provocado neste piezómetro, localizado a cerca de 15 m para NW do poço. Na Figura 5.27 pode observar-se a variação da profundidade ao nível, registada durante os ensaios de injeção e períodos de infiltração, assim como as concentrações de NO_3 e Cl. A influência manifesta-se logo nas primeiras horas do 1º ensaio pela elevação do nível. Contudo, as oscilações que surgem após esta elevação não têm uma explicação evidente. Quando se acrescenta a esta análise a evolução da concentração de NO_3 e Cl podem retirar-se algumas conclusões sobre uma eventual chegada de uma partícula de água proveniente do poço ao LNEC5, assumindo um escoamento radial e influenciado, podendo, neste caso, estes elementos naturais funcionar como traçadores para identificar uma possível chegada.

Deve salientar-se que as concentrações detectadas nos sensores instalados nas sondas, pelo método do ião selectivo, são menos precisas, comparativamente com os valores resultantes de uma análise química feita em laboratório pelos métodos habituais, designadamente por cromatografia iónica da fase líquida. Assim, os resultados que estes sensores fornecem em termos de concentração de NO_3 e Cl, deverão ser analisados com alguma reserva, em termos de valor absoluto mas, em contrapartida, fornecem uma indicação muito fiável em termos de evolução qualitativa dos respectivos iões analisados. De referir também, que a calibração dos sensores foi realizada de acordo com os procedimentos citados pelo manual das sondas Troll9500, antes da realização de qualquer ensaio.

Foram recolhidas algumas amostras de água, antes e após o ensaio, para análise química em laboratório dos iões maioritários, por métodos mais rigorosos. Os resultados foram projectados em diagrama de Piper e na Figura 5.28. A água utilizada para a recarga, proveniente do aquífero profundo, e a água do poço (antes do ensaio) são do tipo bicarbonatada cálcica ou magnésiana; a água do LNEC5 é do tipo cloretada cálcica ou magnésiana. O único elemento que se destaca na Figura 5.28 é o NO_3 cuja concentração era baixa no poço (cerca de 6 mg/L), antes do ensaio, e que após a sua realização passou para cerca de 60 mg/L; no LNEC5 e no furo de captação as concentrações iniciais eram semelhantes e após o ensaio desceram no LNEC5 para cerca de 39 mg/L. Esta foi a

razão para se ter seleccionado este elemento como traçador para identificar uma eventual chegada ao LNEC5. Assim, a primeira chegada ao LNEC5 foi identificada no dia 06/03 cerca das 08h:45 (cerca de 17,1 horas após o início do ensaio), quando a concentração de NO₃ desce para cerca de metade, voltando depois a subir e a estabilizar por algumas horas. Esta situação foi interpretada como a chegada de água proveniente do poço com uma concentração inicial mais baixa em NO₃, diferente do valor ligeiramente superior que mais tarde se atingiu neste piezómetro. Os parâmetros hidráulicos V_i, V_D e K foram estimados em 21,05 m/d, 6,95 m/d e 46,32 m/d, respectivamente (sendo n=0,33 e i=0,15²).

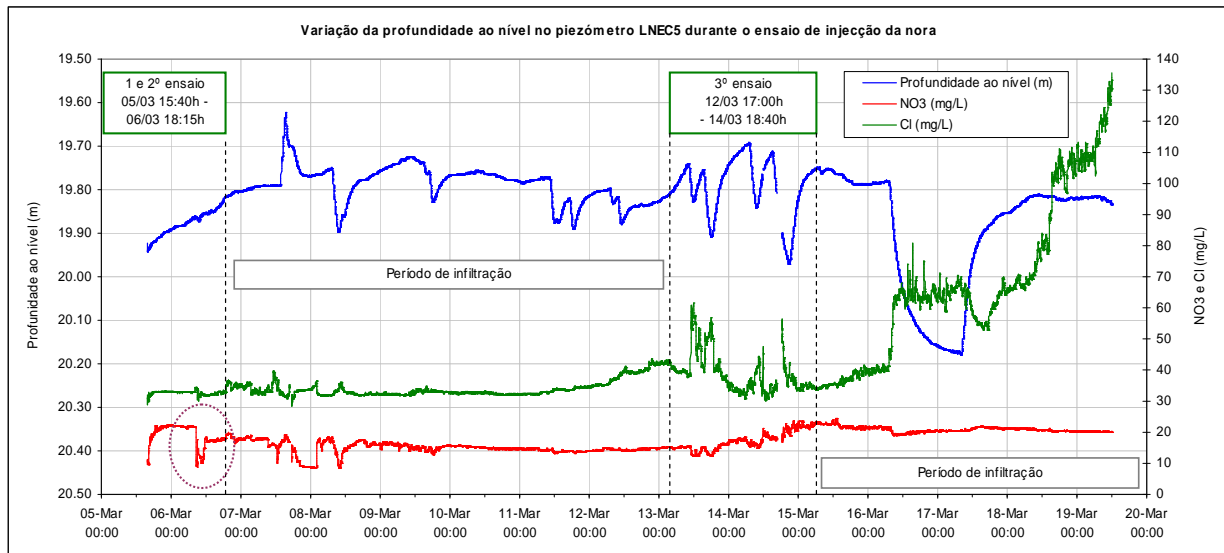


Figura 5.27 – Variação da profundidade ao nível no piezómetro LNEC5 e das concentrações de cloretos e nitratos, durante os ensaios de injeção no poço

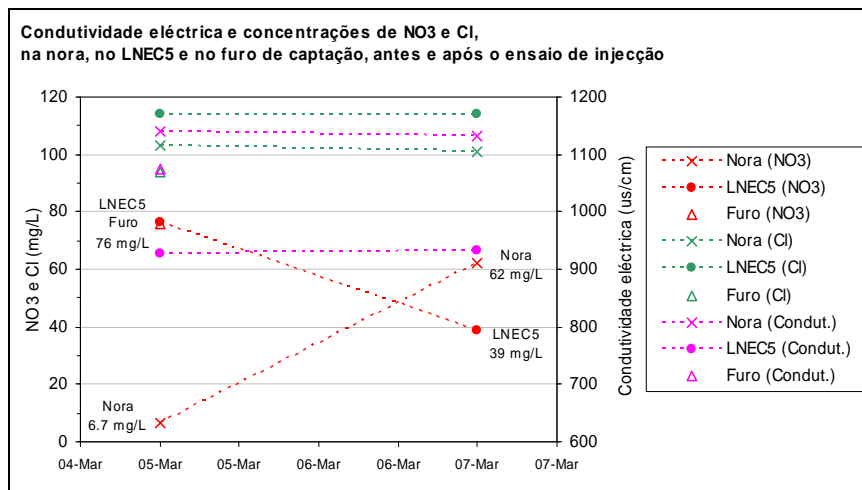


Figura 5.28 – Condutividade eléctrica e concentrações de NO₃ e Cl obtidas no poço, no LNEC5 e no furo de captação, antes e após o ensaio de injeção no poço

² Informação para calcular o gradiente hidráulico entre o Poço e o LNEC5, às 8h:45 no dia 06/03:

- Profundidade ao nível LNEC5 = 19.86-0.25 = 19.61 m
- Profundidade ao nível Poço = 16.85 m
- Nível piezométrico LNEC5 = cota - prof. ao nível = 5.36 m
- Nível piezométrico Poço = cota - prof. ao nível = 7.63 m
- Distância = 15 m

B) Injecção num furo de diâmetro intermédio

Foi realizado um outro ensaio de injecção, num furo disponível no local do Areal Gordo, com diâmetro intermédio de 0,5 m, designado por LNEC6. O ensaio teve a duração de um dia e permitiu a determinação dos valores de infiltração e a sua comparação com os obtidos no ensaio do poço. O período de injecção teve a duração de 4,2 horas, tendo sido utilizado o mesmo tipo de equipamento para monitorização do nível de água e a mesma fonte de água para a recarga. Complementarmente, a profundidade ao nível foi medida com uma sonda de registo manual para controlo do nível durante o ensaio. Foi instalado um caudalímetro na saída do tubo de injecção para quantificar os caudais de injecção. Neste caso adoptaram dois caudais de injecção, o primeiro de 20 m³/h necessário para o enchimento do furo até à superfície e o segundo, de 2,2 m³/h, necessário para manter constante o nível de água no LNEC6. A Figura 5.29 mostra um pormenor do LNEC6 com o sistema de injecção instalado. As principais características deste furo, também aberto no aquífero arenoso superficial, são as seguintes:

- Área do fundo, com diâmetro de 0,5 m = 0,19625 m²
- Área lateral crepinada (com 1 m de ralos) = 1,57 m²
- Área total crepinada = 1,9625 m²
- Profundidade ao nível antes do ensaio = 18,85 m
- Volume total disponível para o ensaio = 3,70 m³
- Profundidade do furo = 28 m



Figura 5.29 – Sistema de injecção utilizado para o furo de diâmetro intermédio (LNEC6) no Areal Gordo (Lobo Ferreira *et al.*, 2007b)

B.1) Análise dos resultados obtidos

Na Figura 5.30 apresenta-se a profundidade ao nível registada no furo LNEC6 durante o ensaio de injecção e assinalam-se os dois períodos de injecção com caudais diferentes. O ensaio teve início às 13h:50 do dia 07/03 e terminou cerca de 4,2 horas mais tarde. Durante o enchimento do furo a sonda de registo contínuo foi retirada, para evitar que se pudesse danificar devido ao caudal de injecção ser elevado, tendo o registo sido feito manualmente. Após o enchimento até à superfície do solo procedeu-se novamente à colocação da sonda e à redução do caudal de injecção para 2,2 m³/h. A taxa de infiltração foi calculada através da variação do nível, após terminado o ensaio, até se atingir o valor do nível inicial (que se verificou em 08/03 às 9h:22), *i.e.*, 7,08 m em 0,64 dias; a taxa de infiltração é de 1,11 m/dia, considerando a infiltração pela base e ralos do furo (área total 1,9625 m²). Tendo em atenção que a taxa de infiltração está directamente relacionada com a carga hidráulica, calcularam-se, também, estes valores

para as primeiras horas, logo após terminado o ensaio (Quadro 5.9). Conseguiu-se a estabilização do nível nos 11,5 m, pouco antes do fim do ensaio; então para uma carga hidráulica de 7,35 m a taxa de infiltração poderia chegar a um valor máximo de 1,12 m/h \approx 26,9 m/d (de acordo com o caudal de injeção $Q_2=2,2 \text{ m}^3/\text{h}$ e área total da secção de $1,9625 \text{ m}^2$). No ensaio *in situ* não se estimou a duração do período com infiltração desta ordem de grandeza.

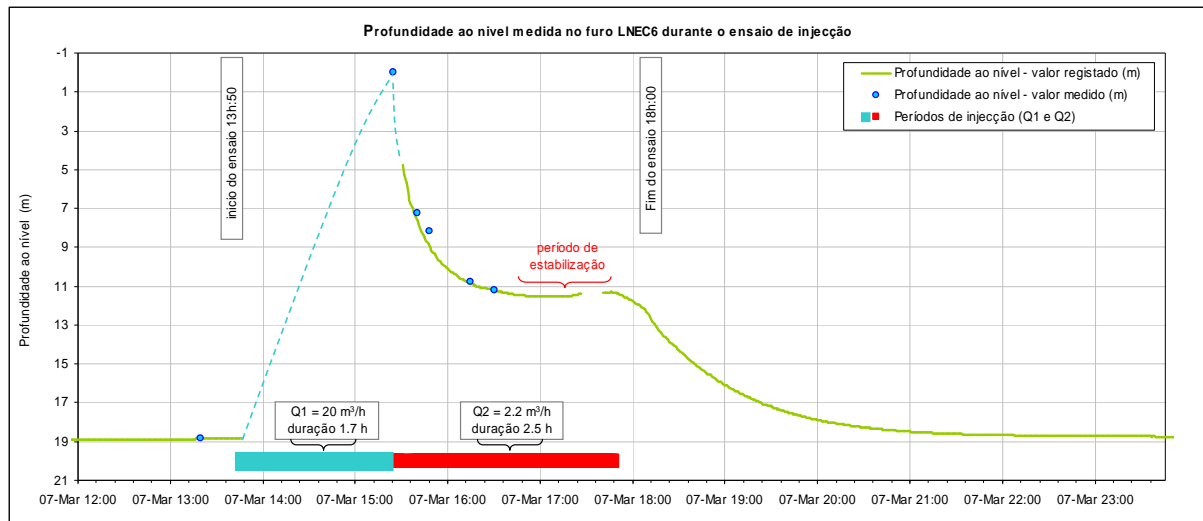


Figura 5.30 – Variação da profundidade ao nível registada no furo LNEC6 durante o ensaio de injeção (Lobo Ferreira *et al.*, 2007b)

Quadro 5.9 – Determinação das taxas de infiltração após terminado o ensaio de injeção no furo LNEC6

	Carga hidráulica (m)	Varição do nível de água (m)	Volume de água infiltrado (m^3/d)	Taxa de infiltração (m/d) ^(*)
1ª hora (07/03 19:00)	7,08 – 3,04	4,31	20,28	10,33
2ª hora (07/03 20:00)	3,04 – 1,24	1,80	8,49	4,33
3ª hora (07/03 21:00)	1,24 – 0,64	0,60	2,83	1,44
4ª hora (07/03 22:00)	0,64 – 0,46	0,18	0,86	0,44
...
15ª hora (08/03 09:22)	7,08 – 0	7,08	2,17	1,11

(*) As taxas de infiltração calcularam-se em função da área total da secção crepinada do furo.

5.4 Ensaios de recarga artificial em Carreiros

5.4.1 Bacias de infiltração

Em Novembro de 2006, zona de Carreiros, no leito do rio Seco, foi desenvolvido um sistema de recarga artificial composto por duas bacias de infiltração, preenchidas até à superfície por cascalho grosseiro, que facilitam a infiltração natural do escoamento superficial. A informação geológica e geofísica do local, possibilitou definir a profundidade das bacias, de forma a que o preenchimento do leito do rio, formado por material aluvionar, muito cimentado e pouco permeável, fosse removido e substituído por outro, de natureza semelhante, mas mais permeável. As bacias, com uma área de 100 m^2 cada ($20\text{m}\times 5\text{m}$) e cinco metros de profundidade, ocupam todo o leito do rio e distam, uma da outra, apenas cinco metros. A fonte de água para a recarga provém do escoamento do rio, quando este ocorre, normalmente após episódios de precipitação mais intensos. A monitorização do aquífero superficial realizou-se através de dois piezómetros, LNEC1 e LNEC2, e do aquífero confinado por um, LNEC3. Na Figura 5.31 apresenta-se um esquema com as bacias de infiltração e a localização dos piezómetros.

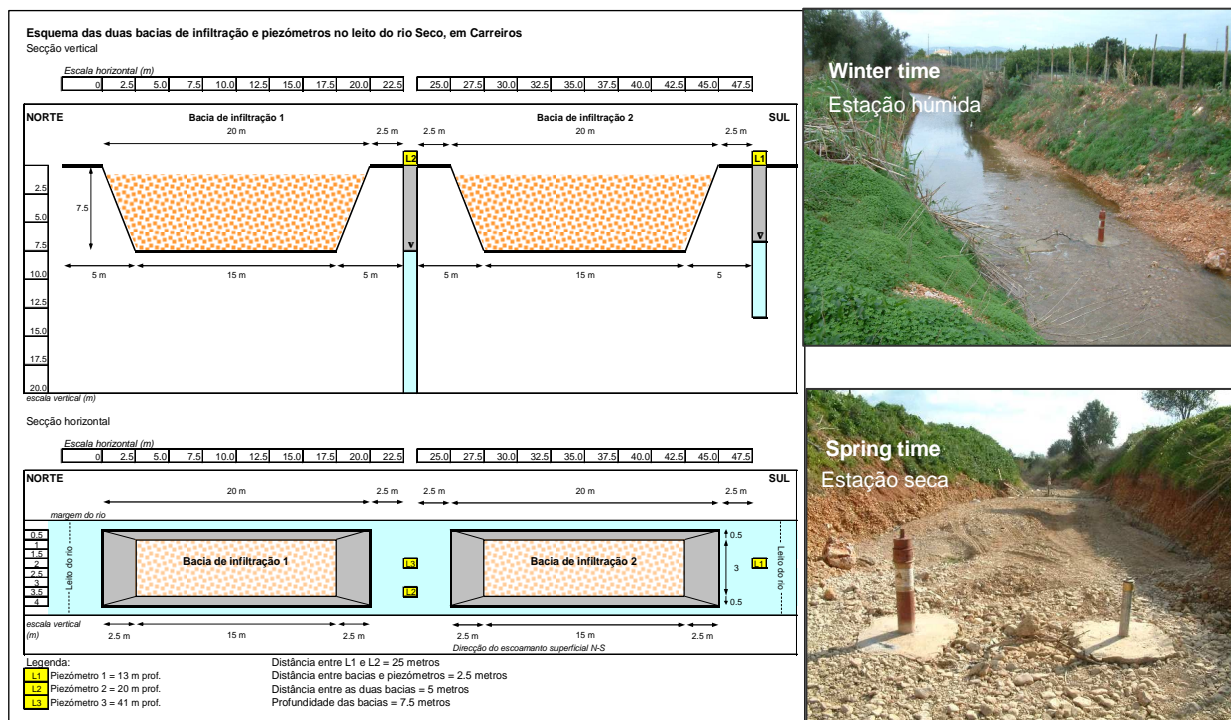


Figura 5.31 – Do lado esquerdo um esquema vertical e em planta das bacias de infiltração e piezómetros no leito do rio Seco, em Carreiros. Do lado direito um pormenor do rio no mesmo local, durante a estação húmida e durante a estação seca

5.4.2 Objectivos e metodologia

O principal objectivo proposto para este tipo de estrutura de recarga artificial consistiu na determinação da sua eficiência para facilitar a infiltração da água do rio, avaliada em termos de incremento na quantidade e melhoria na qualidade da água do aquífero superficial. Complementarmente, este sistema também serviu de base para a realização de um ensaio de recarga seguido de um ensaio de traçador, de forma a estimar taxas de infiltração e velocidades de escoamento. A sua construção, no próprio leito do leito do rio, esteve relacionada, por um lado, com a pouca disponibilidade de áreas sem ocupação do solo, e por outro, com a proximidade da fonte de água. O facto do escoamento superficial apenas se verificar episodicamente e, de um modo geral, durante a estação húmida, facilitou a sua construção e monitorização. O preenchimento com cascalho à superfície evitou causar perturbação visual do local, não afectando a infiltração da água e promovendo a retenção das partículas finas, nos horizontes mais superficiais. A monitorização contínua por intermédio de sondas multiparamétricas, instaladas nos piezómetros, permitiu o acompanhamento dos resultados dos ensaios de recarga facilitada. Os parâmetros medidos foram os mesmos já referidos anteriormente para os outros ensaios. A aplicação de métodos geofísicos constituiu uma inovação para a interpretação dos resultados durante o ensaio de recarga e de traçador. O equipamento de monitorização instalado incluiu ainda a colocação de dois sensores (Figura 5.32) para medição automática da altura de água no rio, fixos a duas secções transversais de cimento, uma localizada a montante da primeira bacia e outra, a jusante da segunda bacia (em Janeiro de 2007). Pretendia-se, através da monitorização contínua nestes limnígrafos, calcular o caudal atravessado entre as duas secções e estimar o volume de água que, eventualmente se infiltraria nas bacias. Problemas técnicos, relativamente ao funcionamento dos sensores, não possibilitaram a obtenção de registos durante o primeiro ciclo hidrológico monitorizado. Foram contudo registados os dados para o semestre húmido do segundo ciclo hidrológico monitorizado, de Out./2007 a Mar./2008.



Figura 5.32 – Sensor de medição do nível de água instalado no leito do rio Seco, respectiva secção transversal e equipamento de registado contínuo de dados.

Relativamente ao esquema geológico do local, a informação fornecida durante a perfuração dos piezómetros, em Setembro/Outubro de 2006 e o estudo preliminar por métodos geofísicos, realizado em Janeiro de 2007 (ver Secção 5.4.7), possibilitaram a definição da profundidade das bacias. Resumindo a informação litológica atravessada neste local: o LNEC1, está aberto no aquífero superficial arenoso (13 m de profundidade); o LNEC2 está aberto também no aquífero superficial arenoso, terminando numa camada mais argilosa (20 m de profundidade); o LNEC3 está aberto no aquífero confinado calcarenítico do Miocénico (40 m de profundidade) (no Anexo 3 faz-se a descrição das colunas litológicas nestes piezómetros). A Figura 5.33 apresenta um esquema conceptual hidrogeológico no local.

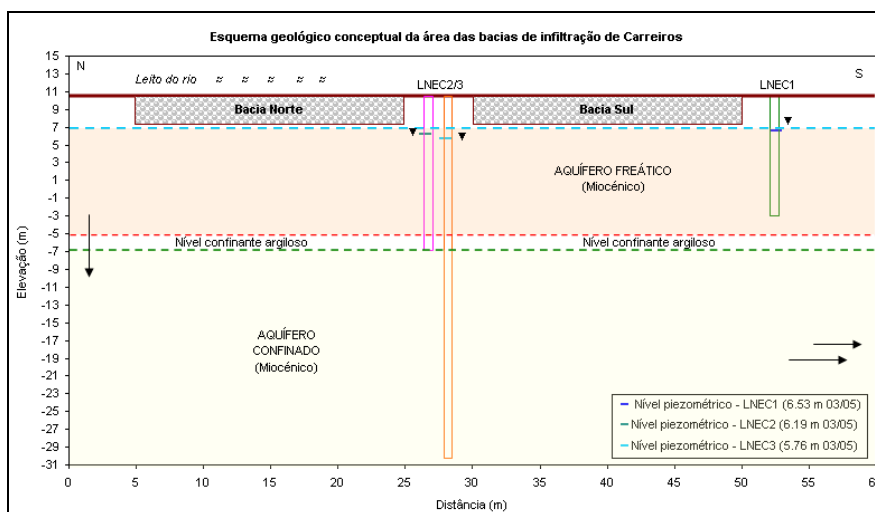


Figura 5.33 – Esquema hidrogeológico conceptual da área das bacias de infiltração de Carreiros

5.4.3 Descrição dos ensaios de recarga natural e de recarga artificial/traçador

Os ensaios de recarga natural foram realizados nos seguintes períodos: a) estação húmida, entre Outubro de 2006 e Março de 2007; b) estação seca, entre Abril e Setembro de 2007; c) estação húmida, entre Outubro de 2007 a Março de 2008. O primeiro período corresponde à estação em que a irrigação dos campos de cultivo é reduzida, conseqüentemente as extracções são menores e os níveis piezométricos mais altos, quer no aquífero profundo quer no superficial; em oposição, o segundo período corresponde à época de irrigação, havendo extracções mais elevadas no aquífero confinado e um rebaixamento dos níveis em ambos os aquíferos. As oscilações sazonais

na piezometria ficam deste modo dissimuladas pelas variações dos volumes de irrigação e extracção.

Em Maio de 2007 realizou-se um ensaio de recarga artificial, seguido de um ensaio de traçador na bacia de infiltração localizada a Sul. O ensaio de recarga teve a duração de três dias e pretendia-se determinar as taxas de infiltração na bacia, antes do ensaio de traçador que se seguiu, e que teve a duração de quatro dias. A água utilizada para os ensaios era proveniente do aquífero profundo, extraída no furo LNEC3. O traçador utilizado foi, à semelhança do ensaio na bacia do Areal Gordo, o NaCl, distribuído uniformemente na bacia, dissolvido com um caudal de descarga constante de 22 m³/h em 500 Kg de NaCl. A Figura 5.34 mostra um pormenor da bacia e piezómetros antes e durante a realização do ensaio de infiltração. Na Figura 5.35 e na Figura 5.36 observam-se algumas das fases relativas à colocação e infiltração do traçador.



Figura 5.34 – Pormenor da bacia de infiltração (Sul) de Carreiros, antes e durante a realização do ensaio de infiltração



Figura 5.35 – Colocação do traçador (NaCl) na bacia de infiltração de Carreiros

O ensaio de infiltração realizado na bacia Sul iniciou-se com o enchimento da bacia no dia 03/05 às 15h:45. O fundo da bacia, coincidente com a superfície topográfica no leito do rio, foi ligeiramente rebaixado, de forma a manter-se uma altura de água na bacia, de cerca de 20 cm. O caudal inicial fixou-se em 22 m³/h, tendo sido regulado para um valor mais baixo (5 m³/h), necessário para manter constante a altura de água. Este procedimento foi mantido durante sete dias, terminando a 11/05 pelas 16h:25. No dia 08/05 às 9h:35 iniciou-se a infiltração do traçador na bacia. A monitorização do nível nos piezómetros foi feita pelas sondas multiparamétricas e manualmente. A recolha de amostras destinadas a análise química e a medição de parâmetros *in situ* foi realizada duas a quatro vezes por dia. A monitorização do nível de água e registo de condutividade eléctrica, a diferentes profundidades, também foi feita num pequeno piezómetro localizado no interior da bacia (*cf.* Figura 5.37 com o equipamento instalado).

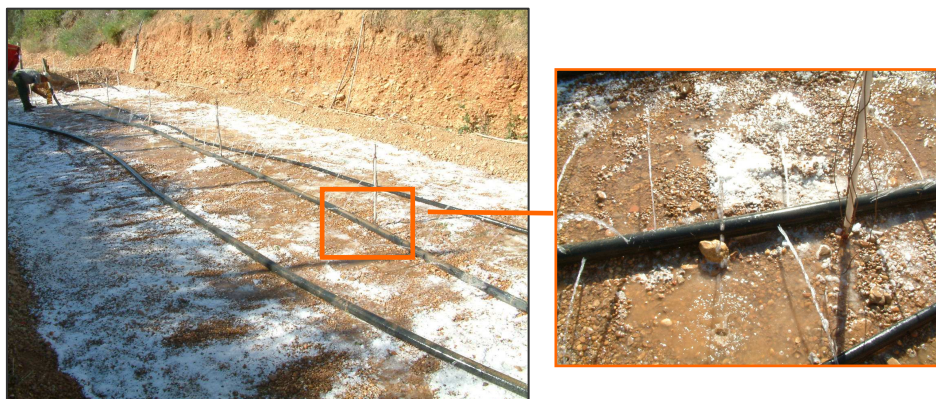


Figura 5.36 – Pormenor durante o enchimento da bacia e da infiltração do traçador

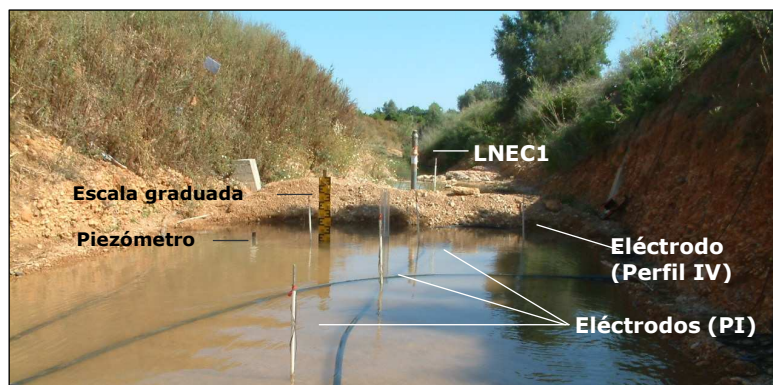


Figura 5.37 – Vista para Sul da Bacia de infiltração durante o ensaio de traçador e equipamento instalado

5.4.4 Análise dos resultados obtidos durante os episódios de recarga natural (quantidade e qualidade)

Os primeiros resultados da monitorização nos piezómetros LNEC1, LNEC2 e LNEC3, relativos à estação húmida (Out./2006 – Mar./2007) apresentam-se na Figura 5.39 e na Figura 5.39; o primeiro gráfico mostra a variação no nível piezométrico e o segundo as concentrações de NO_3 analisadas na água subterrânea e superficial. No mesmo gráfico representam-se valores de precipitação diária registados na estação mais próxima (Estói), e os valores de caudal médio diário medidos na estação hidrométrica de Coiro da Burra, indicando os períodos de ocorrência de escoamento superficial no rio Seco. A análise destes resultados permitiu concluir que os níveis piezométricos tendem a subir durante os meses mais chuvosos de Novembro e Dezembro (cerca de 252 mm de precipitação ocorreram nos primeiros três meses do ano hidrológico em análise). Durante estes meses ocorre escoamento superficial no rio Seco e na zona de instalação das bacias de infiltração de Carreiros. As concentrações de NO_3 decrescem consideravelmente no mesmo período e tendem a aproximar-se dos valores medidos na água do rio, especialmente nos piezómetros do aquífero superficial. Estes resultados, ainda preliminares na altura, assinalavam já uma ocorrência relevante para o objectivo principal da investigação proposto no âmbito da Tese e do Projecto Gabardine, relativamente à contribuição que este tipo de sistema poderia ter para a reabilitação da qualidade da água no aquífero superficial da Campina de Faro.

Ainda sobre a Figura 5.38, analisaram-se os valores de piezometria medidos nos piezómetros e em dois poços localizados nas margens do rio, próximas do local das bacias: P8 na margem direita e a P19 na margem esquerda (ver Figura 4.15 com o mapa

de localização dos pontos de água). A variação da piezometria no LNEC1, LNEC2 e P19 é muito semelhante, o que facilmente se explica pelo facto de intersectarem o aquífero superficial. O mesmo sucede relativamente à variação de piezometria obtida no LNEC3 e no P8 (poço com dois furos), só que neste caso ambos estão a intersectar o aquífero confinado. A semelhança da piezometria nestes dois pontos de água pode ser um bom indicador de que ambos representam o mesmo aquífero. Menciona-se o facto de existir uma mistura de água, no caso do P8, que acaba por estar a intersectar os dois aquíferos. Os níveis medidos no aquífero superficial têm uma resposta quase imediata aos eventos de recarga do aquífero, como seria de esperar. No aquífero confinado sucede o mesmo comportamento mas, o facto dos níveis se manterem constantes após terminados os episódios de recarga aponta para que a recarga neste aquífero seja realizada de forma indirecta. Também as variações dos nitratos que se observam na Figura 5.39 servem para demonstrar os aspectos referidos neste parágrafo.

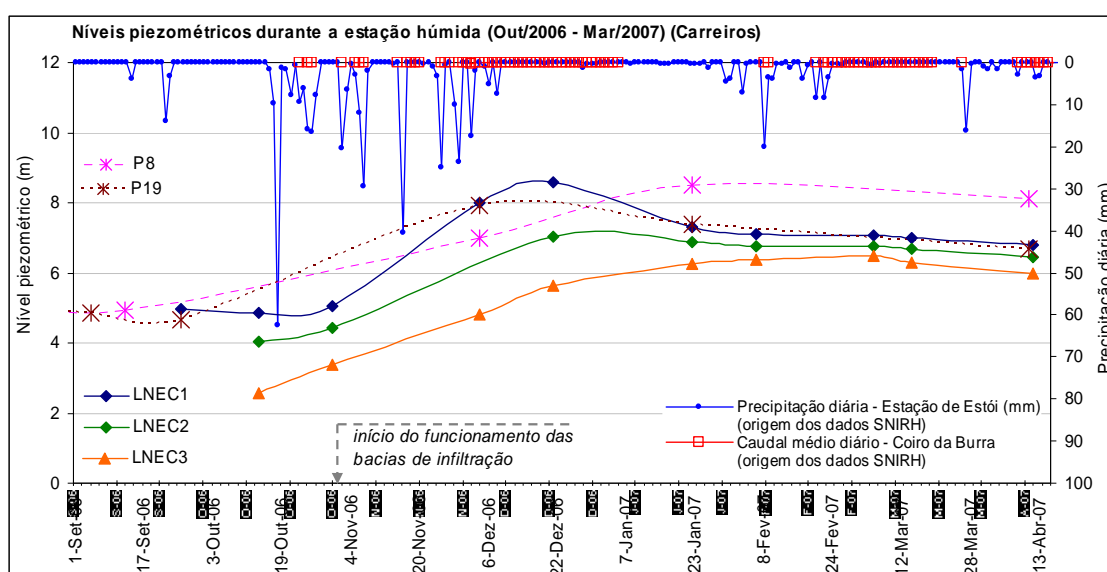


Figura 5.38 - Níveis piezométricos registadas nos piezómetros de Carreiros, durante a estação húmida (Out/2006 – Mar/2007). Precipitação diária registada na estação climatológica de Estói e caudal médio diário registado na estação de Coiro da Burra

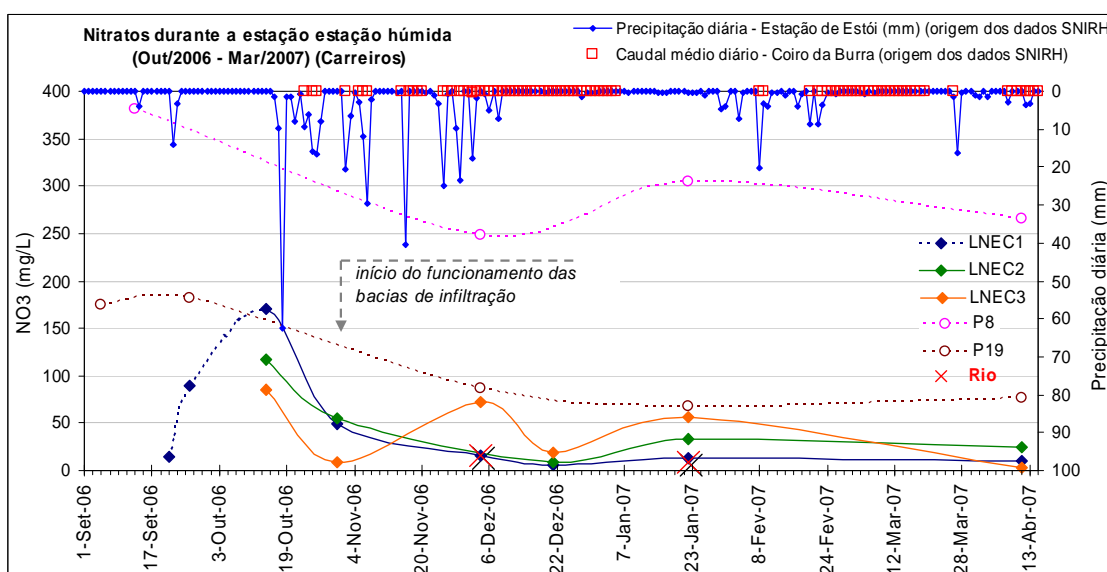


Figura 5.39 – Concentrações de nitratos nos piezómetros de Carreiros, durante a estação húmida (Out/2006 – Mar/2007). Precipitação diária registada na estação climatológica de Estói e caudal médio diário registado na estação de Coiro da Burra

O potencial hidráulico de dois pontos de água no mesmo local, que intersectam dois aquíferos diferentes (como sucede no caso do LNEC2 e do LNEC3) fornece a indicação do gradiente hidráulico, que neste caso se realiza de forma descendente, *i.e.*, do aquífero superficial para o aquífero confinado, sendo mais reduzida a diferença de potencial hidráulico no caso de estações mais chuvosas.

No segundo período, relativo à estação seca do ano hidrológico de 2007, ocorreu precipitação, no final do mês de Agosto e a meados do mês de Setembro (de 53 mm em 25-26/08 e de 5 mm em 14/09, dados do SNIRH da estação climatológica de São Brás de Alportel), provocando dois episódios isolados de escoamento no rio (caudal médio diário de 0,04 m³/s em 25/08 e de 0,01 m³/s em 12/09³, segundo os registos do SNIRH na estação hidrométrica de Coiro da Burra) e a infiltração de água do rio na zona das bacias de Carreiros. A precipitação e os níveis piezométricos do LNEC1 apresentam-se na Figura 5.40; a condutividade eléctrica e as concentrações de NO₃ e Cl apresentam-se na Figura 5.41. Mais uma vez se detectou uma melhoria da qualidade da água, causada pela infiltração da água do rio nas bacias. A infiltração de água na bacia é também evidente pela elevação do nível registada no piezómetro no mesmo período (cf. Figura 5.40).

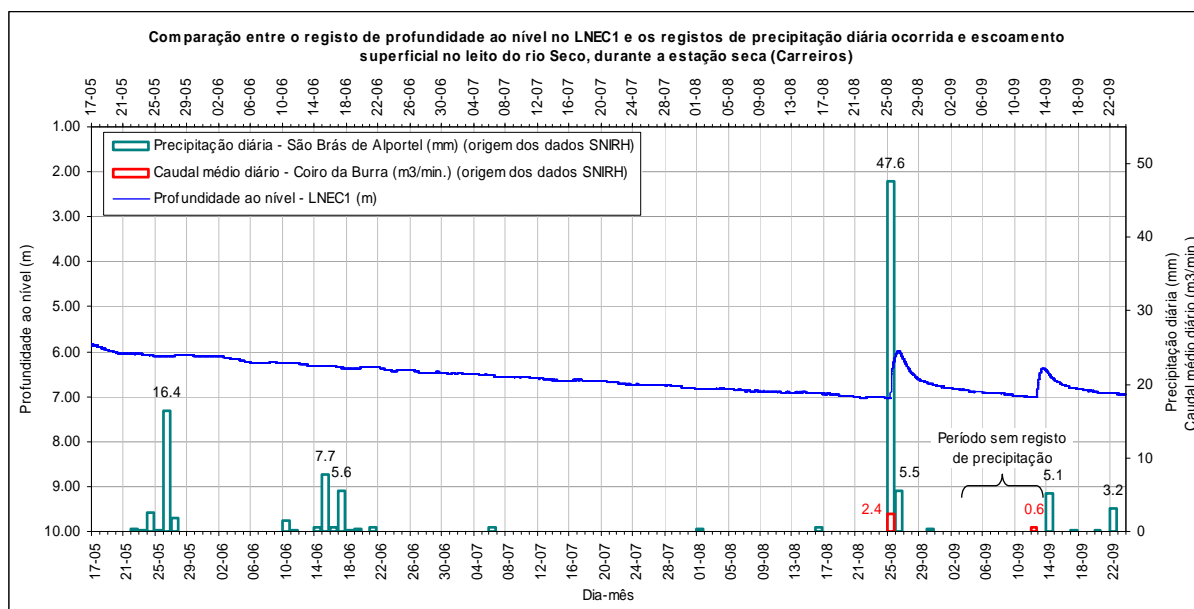


Figura 5.40 – Registo da profundidade ao nível no piezómetro LNEC1, após os primeiros eventos de escoamento superficial no rio Seco. Comparação de resultados com os valores de precipitação diária registados na estação climatológica de São Brás de Alportel e com os valores do escoamento superficial diário médio, registado na estação hidrométrica de Coiro da Burra, para o mesmo período em análise (Lobo Ferreira *et al.*, 2007b)

O semestre húmido do ano hidrológico 2007/2008 possibilitou uma análise mais completa, incluindo a comparação dos registos de piezometria e qualidade da água, efectuados nos piezómetros, com os registos do nível de água no rio. A Figura 5.42 apresenta a variação do nível de água registado nas duas secções, a primeira colocada a montante e a segunda a jusante das bacias de infiltração cujos registos correspondem, respectivamente, aos limnígrafos Norte e Sul. Ocorreram seis eventos de escoamento superficial no rio Seco, ocorrendo o último e, também o mais importante, no início do

³ De assinalar a ausência de dados nos registos da estação Climatológica de São Brás de Alportel entre 03/-13/09, mas a existência do episódio de escoamento superficial no dia 12/09 pressupõe a ocorrência de precipitação neste dia (cf. Figura 5.40). Deste modo, o valor de precipitação que gerou o segundo evento de escoamento terá sido certamente superior a 5 mm.

período da estação seca seguinte (em Abril/2008). Apesar de o nível de água registado na secção Norte ser superior ao registado na secção Sul, apenas o cálculo dos valores de caudal permite avaliar sobre a eventual infiltração preferencial de água entre as duas secções, o que se irá descrever de seguida.

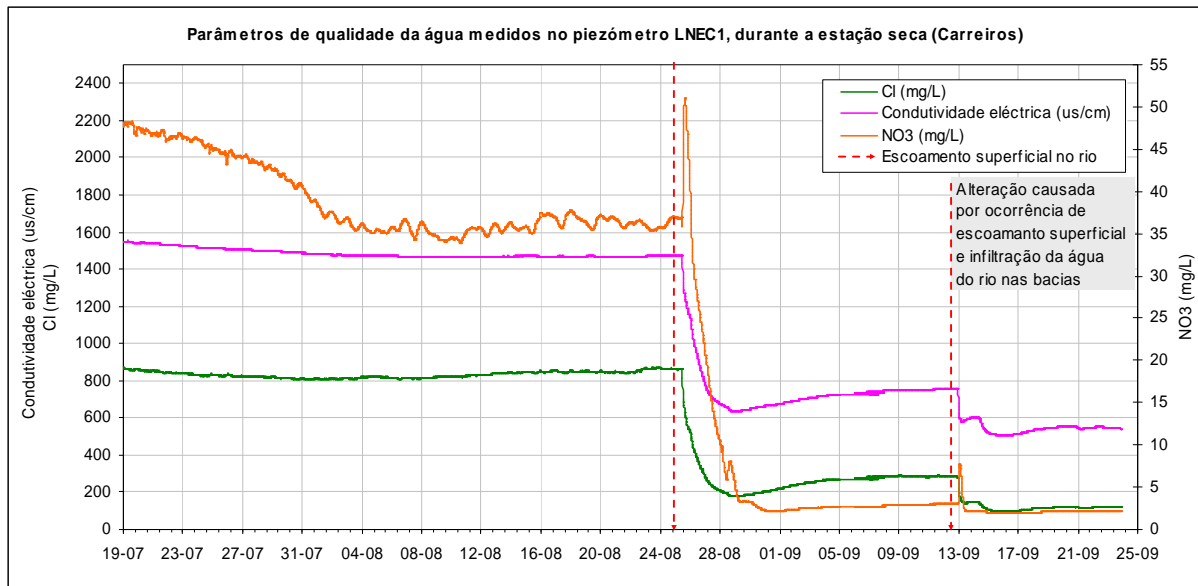


Figura 5.41 - Registo de parâmetros de qualidade da água (condutividade eléctrica, NO₃ e Cl) no piezómetro LNEC1, após os primeiros eventos de escoamento superficial no rio Seco (Lobo Ferreira *et al.*, 2007b)

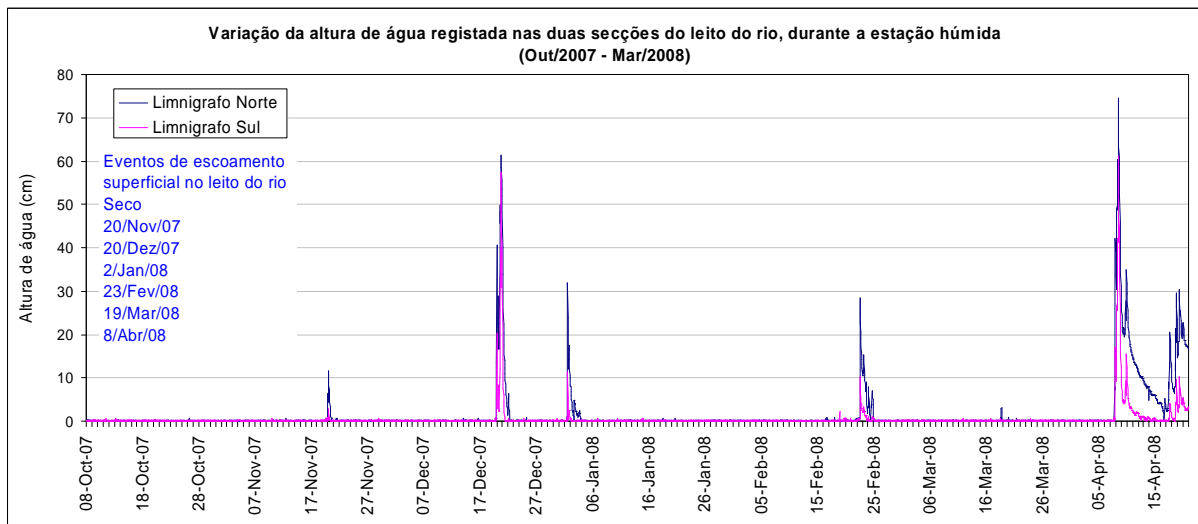


Figura 5.42 - Variação do nível de água registado nas duas secções transversais, a montante e a jusante das bacias de infiltração, durante a estação húmida (Out/2007 – Mar/2008)

Foram determinadas, com base no nível de água e dimensões das duas secções transversais, as respectivas curvas de vazão que permitem calcular o caudal que passa em cada secção. As curvas de vazão podem obter-se pela aplicação das fórmulas de Chézy e de Strickler (Lencastre, 1983), que se escrevem do seguinte modo:

$$(Q/\sqrt{i}) = CS\sqrt{R} \quad \text{e} \quad (Q/\sqrt{i}) = K_sSR^{2/3} \quad \text{Eq. 5.1}$$

em que,

Q = caudal (L³/T) = CS√Ri

U = velocidade média numa secção = C√Ri

- i = perda unitária de energia, igual à inclinação do fundo do canal e à inclinação da superfície livre (utilizou-se um valor mínimo para a inclinação de 0,0001).
- C = coeficiente que pode ser dado pela fórmula de Bazin [$C=(87\sqrt{R})/(K_B+\sqrt{R})$] ou de Kutter [$C=(100\sqrt{R})/(K_k+\sqrt{R})$] (aplicou-se neste caso a primeira)
- K_B e K_k = coeficientes que traduzem a rugosidade das paredes (valores tabelados) seleccionou-se $K_B= 1,30 \text{ m}^{1/2}$
- S = Secção molhada [fórmula para a secção transversal = $(l+mh)h$]
 [m=1/1 ; l=largura menor; h=altura de água]
- R = raio hidráulico = S/P em que P =perímetro molhado= $1+2h\sqrt{1+m^2}$
- K_s = coeficiente de rugosidade da fórmula de Strickler ($L^{1/3}/s$) (valor tabelado utilizado 1,3)

Os segundos membros destas igualdades são funções da natureza das paredes e da forma geométrica da secção; fixada a natureza da parede, definem uma função da secção molhada e conseqüentemente da altura de água. Traçada a função $f(h)=CS\sqrt{R}$, o valor de h corresponde à altura de água uniforme. A função $f(h)$ chama-se curva de capacidade de vazão da secção respectiva (Lencastre, 1983). Considerando a largura das secções Norte e Sul de 5,55 m e 6,04 m, respectivamente, e os níveis de água registados foi possível, pela aplicação da fórmula de Chézy, determinar a curva de vazão característica de cada evento monitorizado. A Figura 5.43 apresenta as curvas de vazão determinadas para a secção Norte e Sul. Seleccionou-se como curva de vazão representativa a obtida com os dados do último evento por ter sido o de maior duração e no qual se registaram as alturas de água mais elevadas. A determinação da diferença do caudal que passou em cada secção indica, o volume de água que se infiltrou, no troço do rio entre estes dois pontos, e fornece uma estimativa do volume incorporado no aquífero. Este valor foi avaliado para cada evento e os resultados apresentam-se no Quadro 5.10. Calculou-se um valor aproximado do volume infiltrado nas bacias de cerca, de $0,10 \text{ hm}^3$, entre Outubro/2007 a Abril/2008. Em termos médios e considerando uma superfície de recarga das bacias de 200 m^2 , a taxa de infiltração avaliou-se em $0,77 \text{ m/d}$, sendo contudo de assinalar uma taxa de recarga mais elevada de $1,67 \text{ m/d}$ num evento inicial e um decréscimo nos eventos seguintes que, eventualmente, pode indiciar alguma colmatção do sistema.

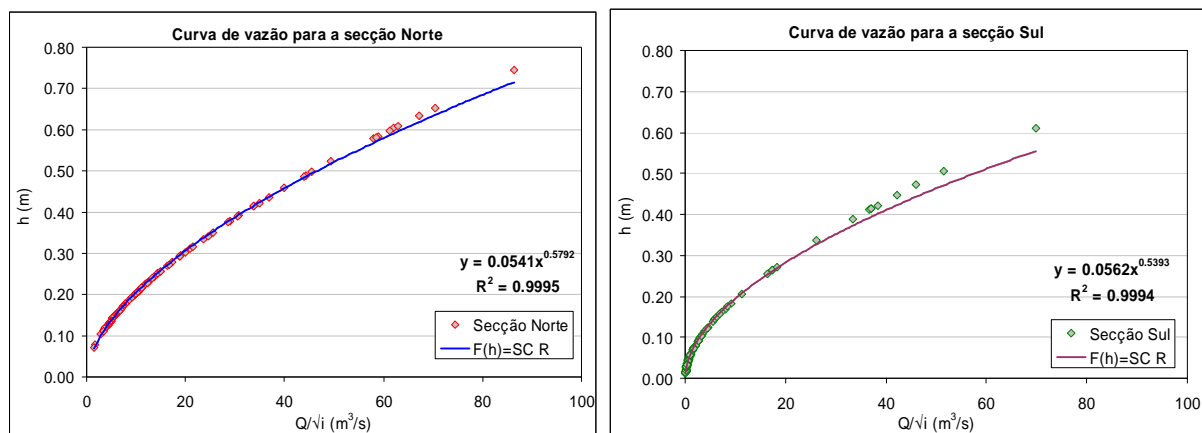


Figura 5.43 – Curvas de vazão determinadas para as secções do rio a Norte e Sul das bacias de infiltração pela aplicação da fórmula de Chézy. Eixo dos xx representa (Q/\sqrt{i})

Quadro 5.10 – Descrição dos eventos de escoamento superficial monitorizados no rio Seco e avaliação do volume de água infiltrado entre secções

Data/hora Eventos de escoamento superficial	Duração do evento de escoamento superficial (h)	Nível de água máximo na secção Norte (m)	Volume de água infiltrado entre secções (m ³)	Estimativa do volume de água infiltrado nas bacias (m ³ /h)	Taxa de infiltração estimada (m/d)
20-11-07 17:00	14	12	555	40	0,20
21-11-07 06:00					
20-12-07 17:00	54	61	18053	334	1,67
22-12-07 23:00					
02-01-08 08:00	44	32	3326	76	0,38
04-01-08 14:00					
23-02-08 07:00	57	28	5676	100	0,50
25-02-08 16:00					
08-04-08 13:00	316	75	71298	226	1,13
21-04-08 17:00					
Volume total infiltrado (hm³)				0,10	
Taxa de infiltração média (m/d)				0,77	

Procurou-se avaliar a relação entre o volume infiltrado estimado e a altura de água nas bacias tentando, à semelhança do que foi feito nos ensaios de recarga artificial anteriores, estabelecer uma relação entre carga hidráulica na bacia e taxa de infiltração determinada. Uma vez que não se conhece a altura de água nas bacias utilizou-se o valor da altura da água registado na secção Norte, sendo contudo de esperar um valor ligeiramente inferior nas bacias. O gráfico da Figura 5.44 apresenta a projecção destes valores, tendo-se verificado que existe uma correlação elevada (97%), dada pela expressão que se assinala no gráfico. Destaca-se uma ausência de correlação num conjunto de pontos para alturas de água maiores; ou seja, a partir dos 0,4 m de altura de água a influência da carga hidráulica na bacia deixa de ser tão evidente, passando outros factores, como a própria permeabilidade das formações abaixo da bacia, a condicionar o processo de infiltração.

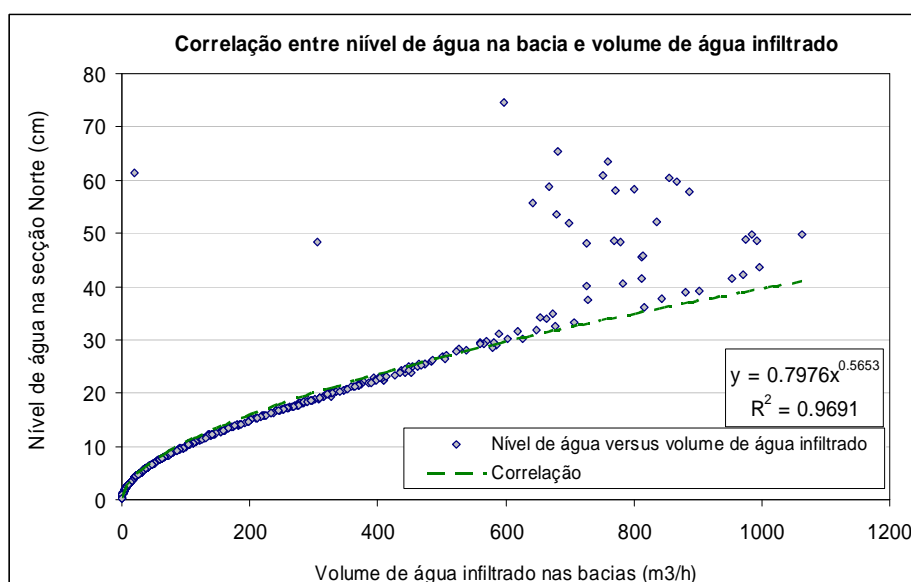


Figura 5.44 – Correlação entre o nível de água na bacia de infiltração e volume de água infiltrado

Finalmente, os registos de qualidade da água (condutividade hidráulica e concentrações de NO₃ e Cl) e piezometria para o período em análise (Outubro/2007-Maio/2008) proporcionaram informações interessantes (Figura 5.45 à Figura 5.50). A variação de piezometria foi feita em separado, para os três piezómetros, devido ao efeito de escala.

Foram representados nos gráficos os períodos de ocorrência de escoamento superficial no rio, de forma a se poder estabelecer uma relação destes eventos com a componente qualitativa e quantitativa das águas subterrâneas.

Nestes gráficos assinaram-se, para efeito de validação dos registos de NO₃ fornecidos pelas sondas, os valores resultantes da análise química laboratorial das amostras recolhidas nas campanhas de Out/2007 e Abr/2008. Esta questão é necessária para validação dos resultados de qualidade dos sensores com os resultados fornecidos pela análise química laboratorial, que se espera ser mais rigorosa. Os resultados fornecidos pelo sensor do LNEC2 são os menos validados, em termos comparativos de valor absoluto, com o resultado laboratorial.

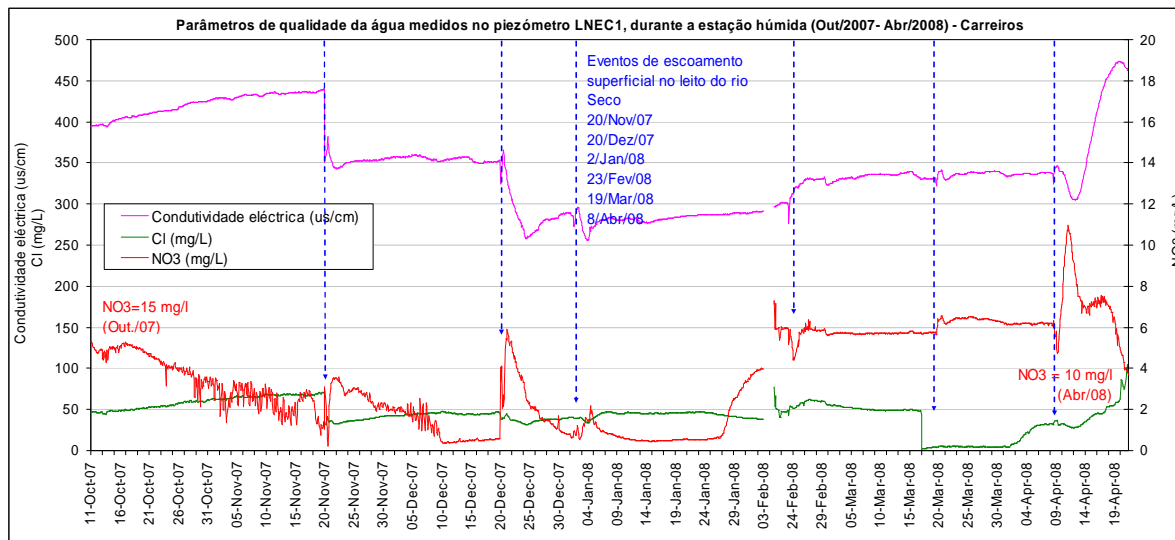


Figura 5.45 – Parâmetros de qualidade da água medidos no piezômetro LNEC1, durante a estação húmida (Outubro/2007 a Abril/2008)

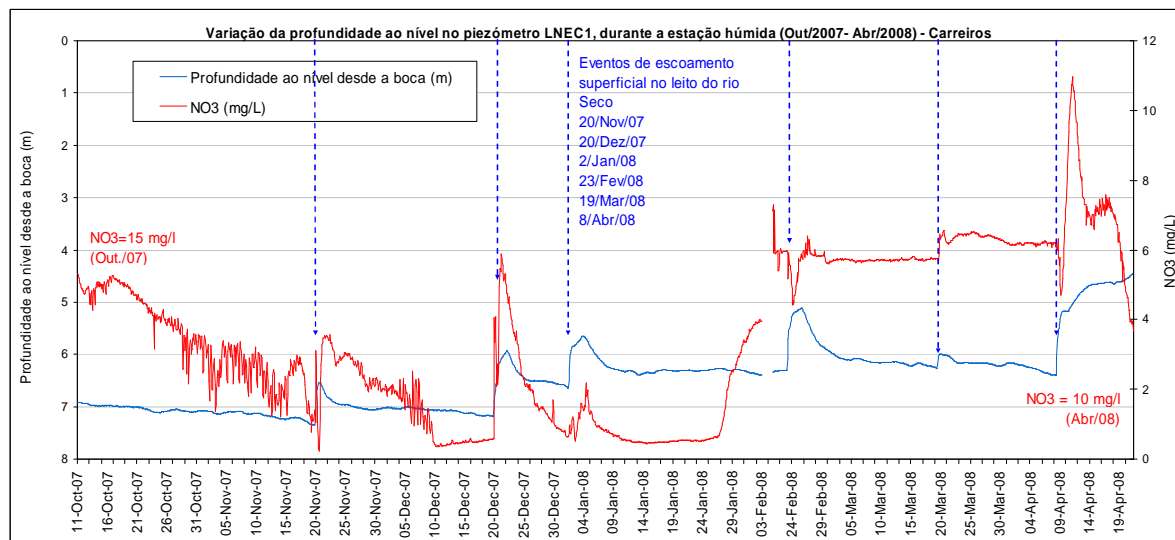


Figura 5.46 – Variação da profundidade ao nível e concentração de NO₃ registadas no piezômetro LNEC1, durante a estação húmida (Outubro/2007 a Abril/2008).

As águas subterrâneas neste local, situado no leito do rio Seco, na zona de Carreiros, apresentam valores baixos⁴ de NO₃, o mesmo também se verificou em uma mais

⁴ Concentrações NO₃<50 mg/L, sendo este o Valor Paramétrico (VP) referido no Decreto-Lei nº 306/2007, de 27 de Agosto, que estabelece o regime da qualidade da água para consumo humano.

amostra de água superficial recolhida durante o último evento de escoamento do rio Seco (Abril/2008), com valor < 10 mg/L.

No registo do piezómetro LNEC1 (Figura 5.45 e Figura 5.46) obteve-se uma série temporal completa do período húmido em análise. Nos piezómetros LNEC2 e LNEC3 apenas se conseguiu uma série temporal parcial por questões relacionadas com avaria do equipamento. O LNEC1, por estar instalado no aquífero superficial, é o que melhor reage e de forma mais pronunciada à infiltração do escoamento superficial. Em termos de qualidade da água, as evidências de melhoria estão bem marcadas quer no LNEC1 quer no LNEC2 (e.g. na condutividade eléctrica). No LNEC1, as oscilações do NO₃ não apresentam sempre o mesmo padrão, no entanto, nota-se uma elevação seguida de descida logo após o evento de infiltração que poderá indiciar a mesma variação na própria água do rio, trazendo no início da chuvada uma carga de sais mais elevada. A concentração de NO₃ tem, contudo, valores com uma baixa ordem de grandeza (<15 mg/L). No caso do LNEC2 (Figura 5.47 e Figura 5.48), onde a concentração de NO₃ inicial é mais elevada (54 mg/L), ocorreu variação de 37 mg/L.

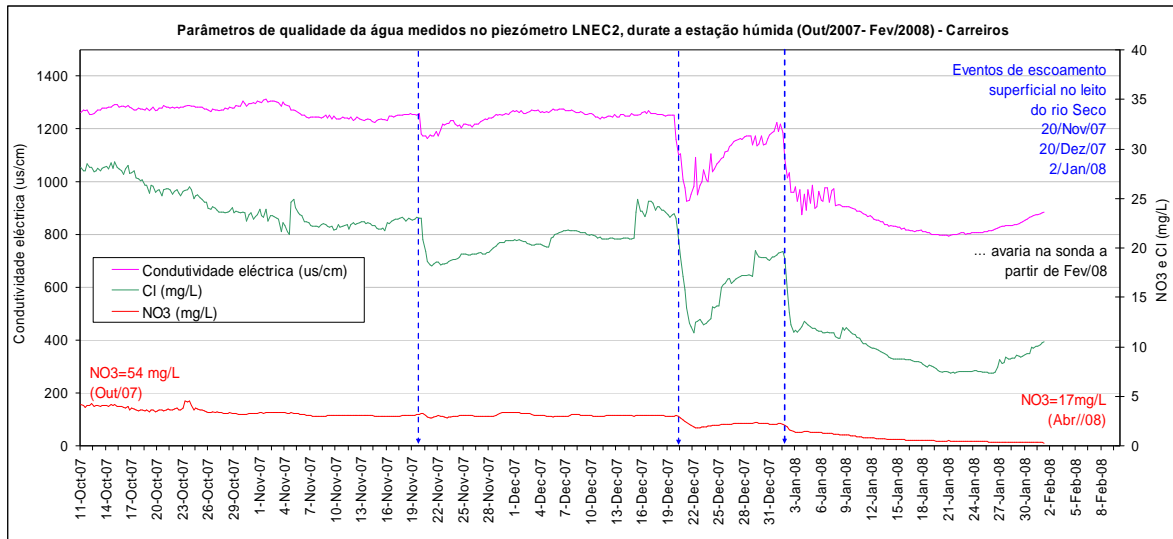


Figura 5.47 - Parâmetros de qualidade da água medidos no piezómetro LNEC2, durante a estação húmida (Outubro/2007 a Abril/2008)

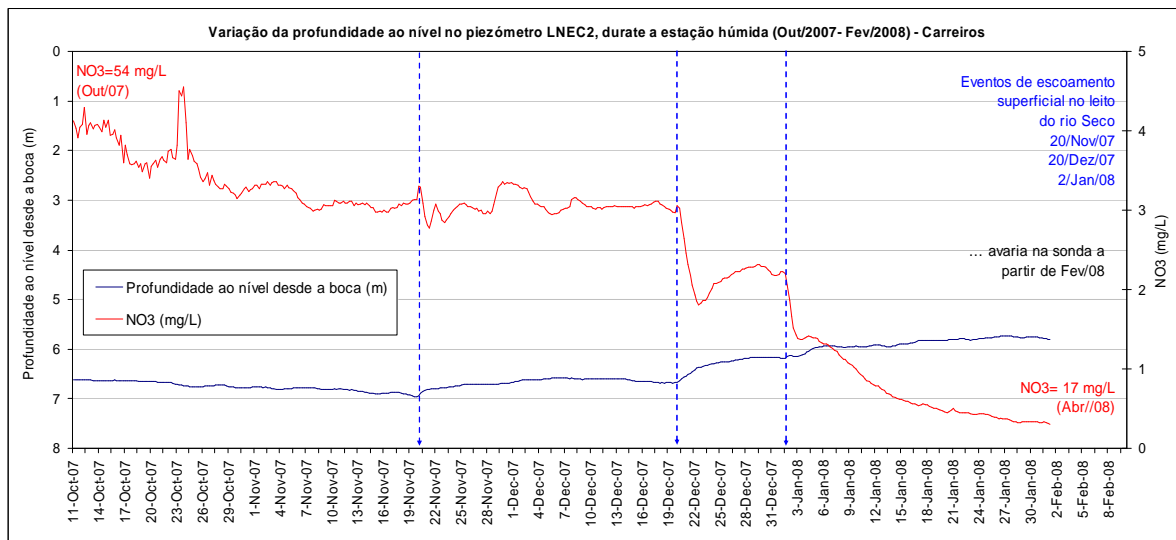


Figura 5.48 - Variação da profundidade ao nível e concentração de NO₃ registadas no piezómetro LNEC2, durante a estação húmida (Outubro/2007 a Abril/2008).

A presença da camada de confinamento que separa o aquífero freático do aquífero confinado está bem assinalada através dos registos de piezometria relativos ao piezómetro LNEC3 (Figura 5.50). Numa primeira análise da Figura 5.49 e Figura 5.50, não parece existir relação entre os episódios de escoamento superficial e a elevação de piezometria, mas o mesmo não se pode afirmar com certeza relativamente às variações de NO_3 e Cl que parecem reagir exactamente nos mesmos períodos. No entanto e porque a resposta da piezometria é pouco evidente, as variações de qualidade devem estar relacionadas com o escoamento subterrâneo profundo influenciado pela infiltração a montante do local de Carreiros.

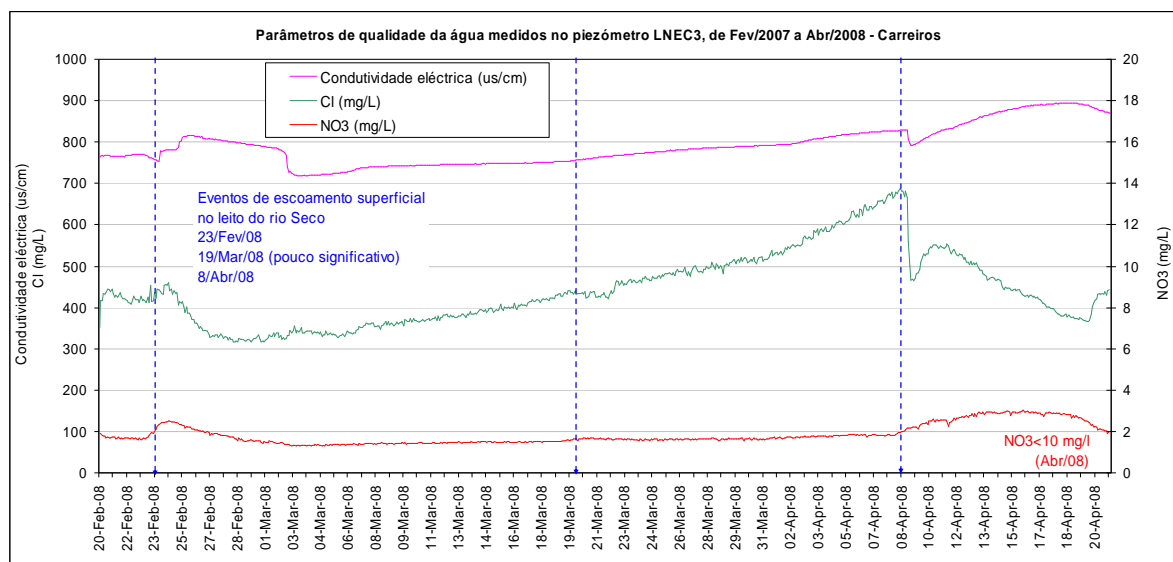


Figura 5.49 – Parâmetros de qualidade da água medidos no piezómetro LNEC3, durante a estação húmida (Outubro/2007 a Abril/2008)

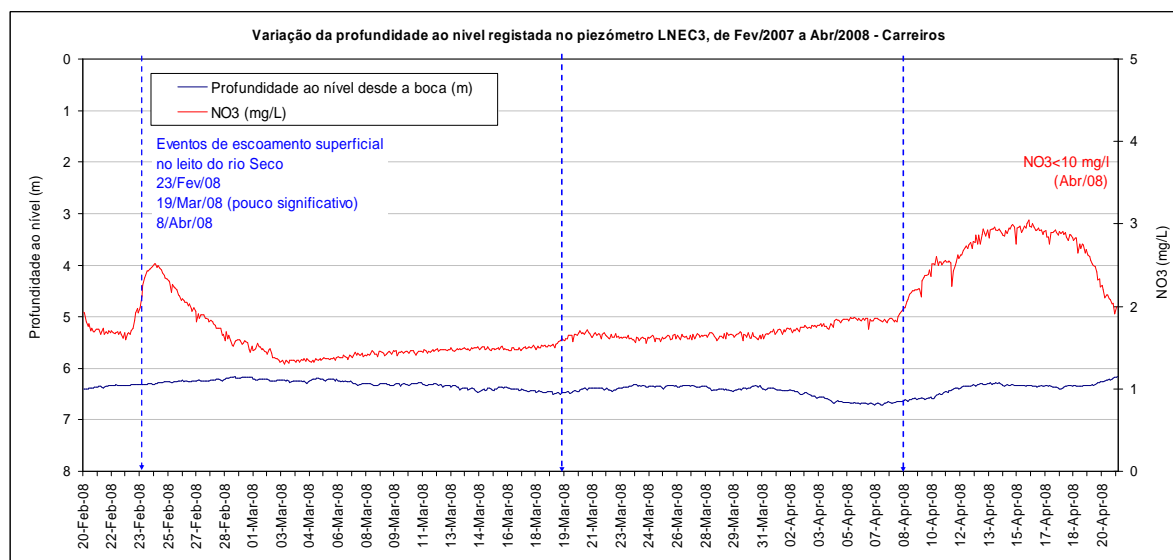


Figura 5.50- Variação da profundidade ao nível e concentração de NO_3 registadas no piezómetro LNEC3, durante a estação húmida (Outubro/2007 a Abril/2008).

5.4.5 Análise dos resultados obtidos no ensaio de infiltração/traçador (quantidade)

A estimativa dos valores relativos às taxas de infiltração na bacia Sul foi realizada de três formas distintas:

1ª) Foi regulado o volume de água descarregado para o interior da bacia, necessário para manter constante uma altura de água de 20 cm, durante o dia. O volume de água infiltrado na bacia, durante o ensaio de recarga foi de 120 m³/dia (*i.e.* 5 m³/h) para uma área total, inicialmente estimada em 100 m². Assim, dividindo pela área da bacia a taxa de infiltração estimada foi de 1,20 m/dia, durante o ensaio.

2ª) Foi medida a descida do nível de água num pequeno piezómetro, instalado no interior da bacia, durante a noite, período em que o ensaio era interrompido. A taxa de infiltração média foi estimada através da descida do nível em função do intervalo de tempo (durante 5 noites). Foram obtidos valores semelhantes de 1,81, 1,36 e 0,66 m/dia, variando de acordo com a carga hidráulica existente que exerce pressão e incrementa a taxa de infiltração (*cf.* Quadro 5.11).

3ª) Foi medida a subida do nível da água no pequeno piezómetro durante o enchimento da bacia, com caudal de 22 m³/h. A comparação destes dois valores pode ser útil para estimar a taxa de infiltração durante o enchimento da bacia.

Quadro 5.11 – Taxas de infiltração estimadas durante os ensaios de infiltração realizados na bacia Sul de Carreiros, com base nos registos de variação da altura de água no pequeno piezómetro

Dias	Tempo (h)	Carga hidráulica (m) ⁽¹⁾	Taxa de infiltração média (cm/h)	Taxa de infiltração média (m/d)
03 a 04 e 07 a 11 Maio	12,6	variável (de 4,69 a 3,54)	7,53	1,81
04 a 07 Maio	63	variável (de 4,58 a 0,90)	5,70	1,36
11 a 18 Maio	168	variável (de 4,71 a 0)	2,75	0,66

⁽¹⁾ *cf.* Figura 5.51 e Figura 5.52

A bacia de infiltração é formada por duas partes, uma subterrânea, preenchida por cascalho grosseiro e outra, acima da superfície. A área das duas partes é ligeiramente diferente uma vez que a bacia escavada em profundidade tem uma ligeira inclinação, especialmente nas paredes perpendiculares ao leito do rio, reduzindo um pouco a sua área subterrânea. A área da bacia acima da superfície medida é de 88 m²; em profundidade foi estimada da seguinte forma: dividindo o caudal de estabilização (120 m³/d) pela taxa de infiltração (1,81 m/d) chegou-se a um valor de 67 m² para a área.

A Figura 5.51 apresenta a subida do nível de água medida no piezómetro, durante três dias para a bacia subterrânea, e apenas num dos dias para a bacia à superfície. Calcularam-se taxas de enchimento para ambas as bacias. A comparação destes valores, convertidos para volumes de água colocados na bacia, com o caudal de enchimento da bacia de 22 m³/h, permitiu inferir sobre a taxa de infiltração. No caso da bacia subterrânea, não foi possível determinar este valor porque o volume calculado foi superior ao volume colocado na bacia, *i.e.*, considerando o valor mais baixo de enchimento de 0,53 m/h × área da bacia (67 m²) = 35,5 m³/h. No caso da bacia à superfície, o valor de enchimento de 0,16 m/h × área da bacia (88 m²) = 14,1 m³/h, o que daria uma taxa de infiltração de 2,16 m/d.

Os valores de porosidade foram também estimados conhecendo o volume total da bacia e o volume de vazios que corresponde ao volume de água colocado na bacia, desde o início do ensaio até aparecer à superfície do solo. Ambos os valores variam em cada dia de ensaio, porque a profundidade ao nível registada no interior da bacia, no início de cada ensaio, é diferente. Estes valores são apresentados no Quadro 5.12. Os valores de porosidade foram calculados considerando duas áreas da bacia, a inicialmente calculada

de 120 m² e a deduzida posteriormente de 67 m², partindo do pressuposto de que realmente a área da bacia seria mais baixa. Os valores de porosidade média foram, para o 1º caso de 0,22 e para o 2º caso de 0,40. Este último valor de porosidade parecer ser bastante mais credível, conhecendo-se já o valor da porosidade do cascalho de enchimento da bacia de 0,41, determinado em laboratório (conforme apresentado no Capítulo 4).

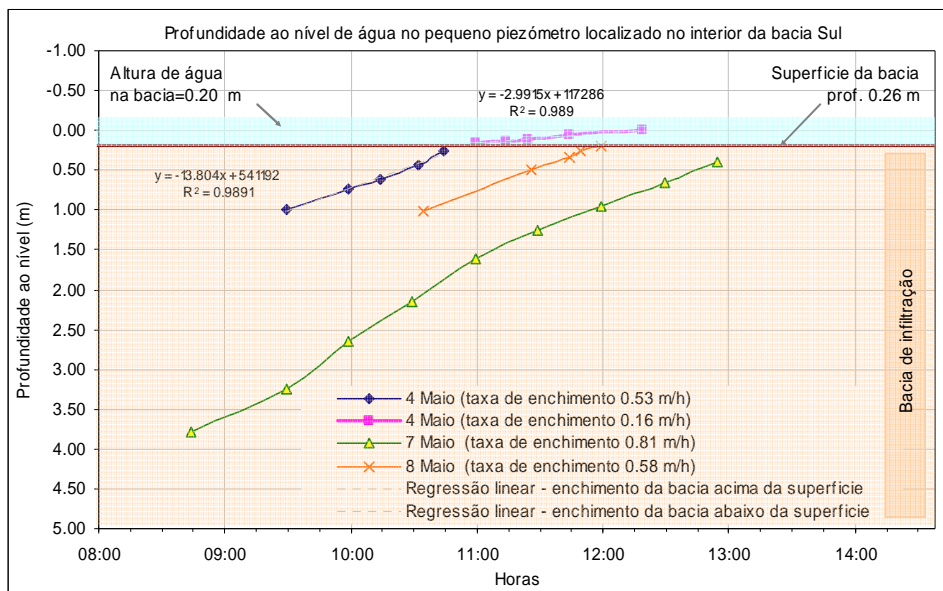


Figura 5.51 – Profundidade ao nível de água registada no pequeno piezómetro colocado no interior da bacia durante o ensaio de infiltração

Quadro 5.12 – Estimativa da porosidade da bacia subterrânea

Dia do ensaio	Vt (área 120m ²) (m ³)	Vt (área 67 m ²) (m ³)	Vv (m ³)	n1	n2
3 Maio	544	304	117	0,22	0,39
4 Maio	120	67	28	0,23	0,41
7 Maio	454	253	95	0,21	0,38
8 Maio	112	62	28	0,25	0,44
9 Maio	125	70	28	0,22	0,40
Média				0,22	0,40

Vt (120 m² área) = Volume da bacia no respectivo dia do ensaio, considerando a estimativa inicial da área da bacia de 120 m² e o valor registado de profundidade ao nível no pequeno piezómetro, localizado no interior da bacia.

Vt (67 m² área) = Volume da bacia no respectivo dia do ensaio, considerando a estimativa da área da bacia de 67 m² e o valor registado de profundidade ao nível no pequeno piezómetro, localizado no interior da bacia.

Vv = Volume de água colocado na bacia desde o início do enchimento até atingir a superfície do solo, no respectivo dia do ensaio (considerando Q=22 m³/h)

n1 = Vv/Vt = Porosidade estimada considerando a área da bacia inicial de 120 m².

n2 = Vv/Vt = Porosidade estimada considerando a área da bacia calculada de 67 m².

Analisou-se a piezometria medida no LNEC1, LNEC2 e LNEC3, durante o ensaio e concluiu-se o seguinte (Figura 5.52): em relação ao LNEC1, aberto no aquífero freático e situado a jusante da bacia, é claramente influenciado pelos eventos de infiltração de água na bacia; o LNEC2, pelo contrário, não sofre influência significativa nem da extracção no LNEC3 (situado ao lado, na direcção W-E) nem da bacia; a proximidade entre ambos deveria provocar, caso estivesse aberto no aquífero mais superficial, um efeito na piezometria, o que não se verifica de forma tão evidente como no LNEC1. Relativamente ao LNEC3, aberto no aquífero confinado, apenas se representaram na Figura os valores da piezometria correspondentes à recuperação do furo após os ensaios diários de extracção de água, destinada ao enchimento da bacia.

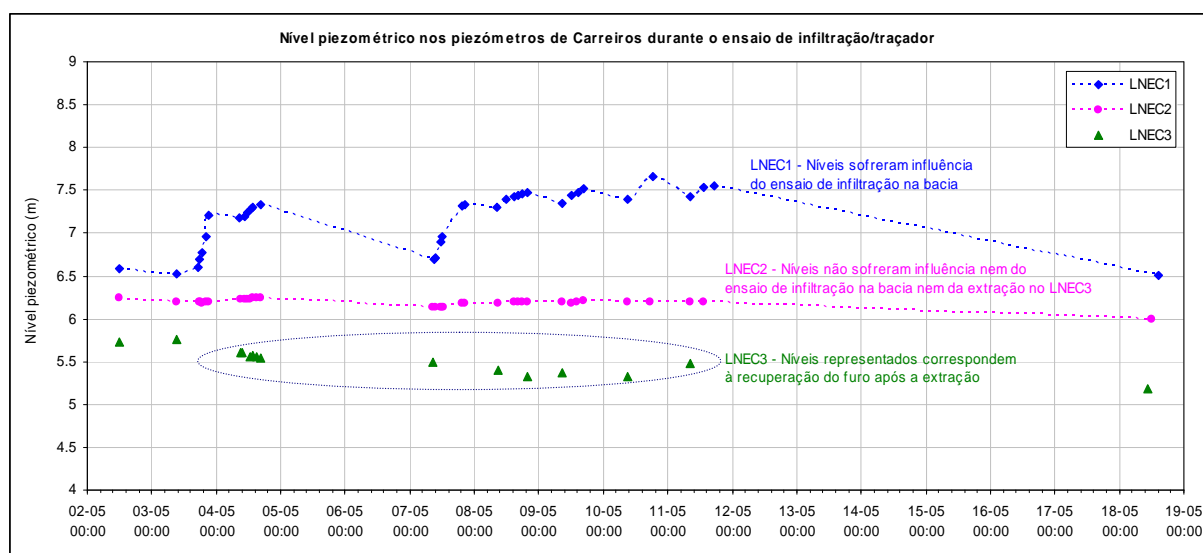


Figura 5.52 – Níveis piezométricos registados nos piezómetros (LNEC1, LNEC2, LNEC3) de Carreiros, durante o ensaio de infiltração/traçador na bacia Sul

5.4.6 Análise dos resultados obtidos no ensaio de traçador (qualidade)

Um dos resultados obtidos durante o ensaio de traçador foi a curva de chegada do NaCl ao LNEC1, traduzida pela variação da condutividade eléctrica e pela variação da concentração de Cl (cf. Figura 5.53). Neste gráfico está também projectada a variação da profundidade ao nível da água registada no mesmo piezómetro. Esta curva permitiu estimar o tempo de chegada de uma partícula de traçador, desde a superfície da bacia de infiltração (atravessando cerca de 5 m de material de cascalho grosseiro do preenchimento da bacia, por escoamento vertical e cerca de 2,5 m em material arenoso até ao piezómetro, na zona saturada). Os valores de porosidade de ambos os materiais são de 41% e 35%, respectivamente. O tempo de percurso total foi de 29 h até se ter detectado o início da subida da curva e de 66 h até se ter detectado o valor máximo ou o pico de chegada do traçador. O traçador move-se como resultado da advecção, causada pelo escoamento subterrâneo, mas é a dispersão hidrodinâmica (causada pela difusão molecular e a dispersão mecânica) que produz a curva que se obtém. Outro processo que afecta o transporte no meio subterrâneo seria o retardamento, causado pela adsorção, mas que neste caso não se aplica porque idealmente o traçador usado é conservativo, não interagindo como o meio envolvente. Então a V_i estimada foi de 2,73 m/d para uma distância total de 7,5 m e um tempo percorrido de 66 h. Separando a V_D para a 1ª parte do trajecto (bacia) e 2ª parte do trajecto (zona saturada) têm-se 1,12 m/d e 0,96 m/d, respectivamente. Esta separação das velocidades deve-se à presença de materiais com diferentes valores de porosidade. A k na zona saturada foi estimada em 2,82 m/d, assumindo como gradiente entre o LNEC1 e o pequeno piezómetro, colocado no interior da bacia, 0,34⁵.

De salientar que os valores calculados correspondem ao escoamento influenciado, por efeito de um ensaio de recarga artificial, estando por este motivo sobrestimados em relação aos valores reais.

⁵ O gradiente determinou-se entre o LNEC1 e o pequeno piezómetro instalado na bacia. A distância entre ambos é de 6,60 m e a diferença de nível entre os dois de 2,25 m. A altura de água no piezómetro era de 20 cm acima do solo, sendo este valor correspondente também ao rebaixamento que se efectuou na superfície da bacia. Assim, o nível de água no piezómetro coincide com a superfície topográfica. A profundidade ao nível no piezómetro era de 2,25 (3,7-1,45 m). Logo o gradiente hidráulico calculou-se em 0,34.

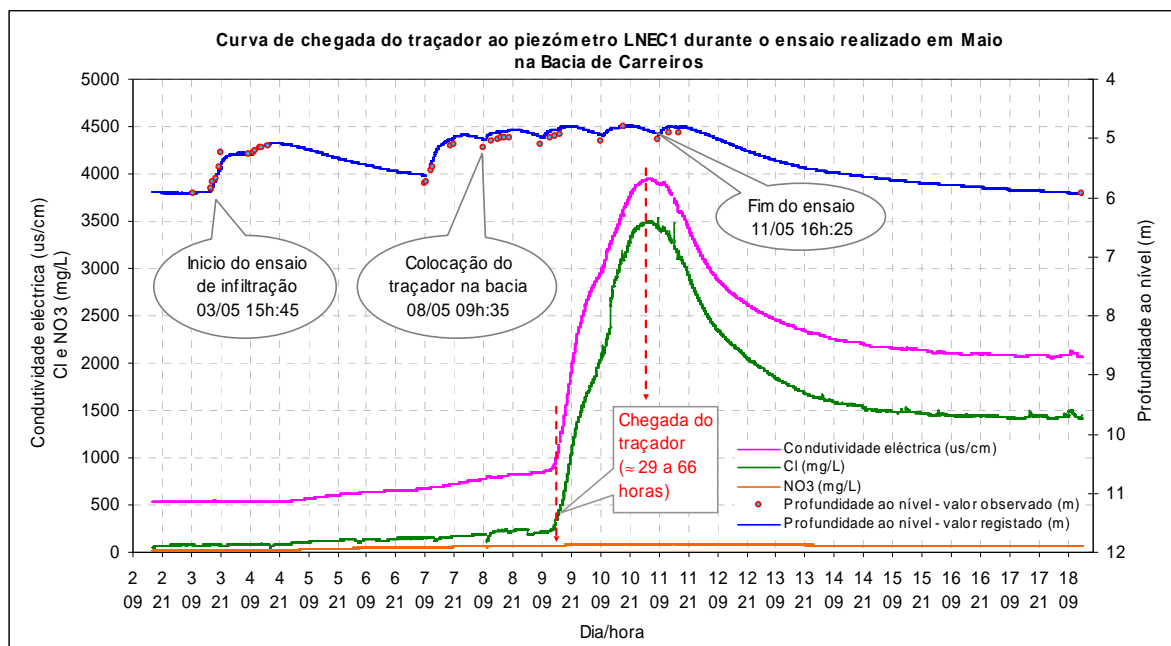


Figura 5.53 – Parâmetros de qualidade da água (condutividade eléctrica, concentrações de Cl e NO₃) e profundidade ao nível monitorizados no piezômetro LNEC1 durante o ensaio de traçador na bacia de infiltração de Carreiros (Lobo Ferreira *et al.*, 2007b)

A avaliação do ensaio de traçador, em termos de qualidade da água, foi completada com a recolha de amostras de água nos três piezómetros e na água da bacia, para medição dos parâmetros físico-químicos *in situ* e posterior análise química de aniões maiores. Os resultados mais relevantes estão apresentados na Figura 5.54 (concentrações de Cl, NO₃, SO₄ e condutividade eléctrica). A influência do ensaio de traçador é nitidamente assinalada no LNEC1, não só por se localizar para jusante da bacia mas também por estar aberto no aquífero freático, a uma profundidade de cerca de 4,5 m. O LNEC2, localizado para montante da bacia não evidencia a influência do ensaio de traçador. Contudo, os aniões analisados sofreram um ligeiro decréscimo durante a infiltração de água na bacia, para voltarem, após terminada a influência do ensaio, aos valores iniciais. A água da bacia era proveniente do LNEC3, pelo que a composição das duas águas é muito semelhante, exceptuando o período curto de dissolução do traçador na água da bacia, altura em que a concentração de Cl atinge os 218 mg/L e a condutividade eléctrica 4280 μ s/cm. Estes valores máximos estão abaixo dos que seriam de esperar conhecendo a quantidade de NaCl adicionado à bacia, o que se deve ao facto desta amostra ter um desfasamento de cerca de 2,5 horas relativamente à altura de colocação do traçador. Por outro lado, também a sua elevada taxa de dissolução na água da bacia e maior densidade da água salobra resultante facilitam a rápida infiltração do traçador nos materiais que constituem a bacia e percolação em profundidade.

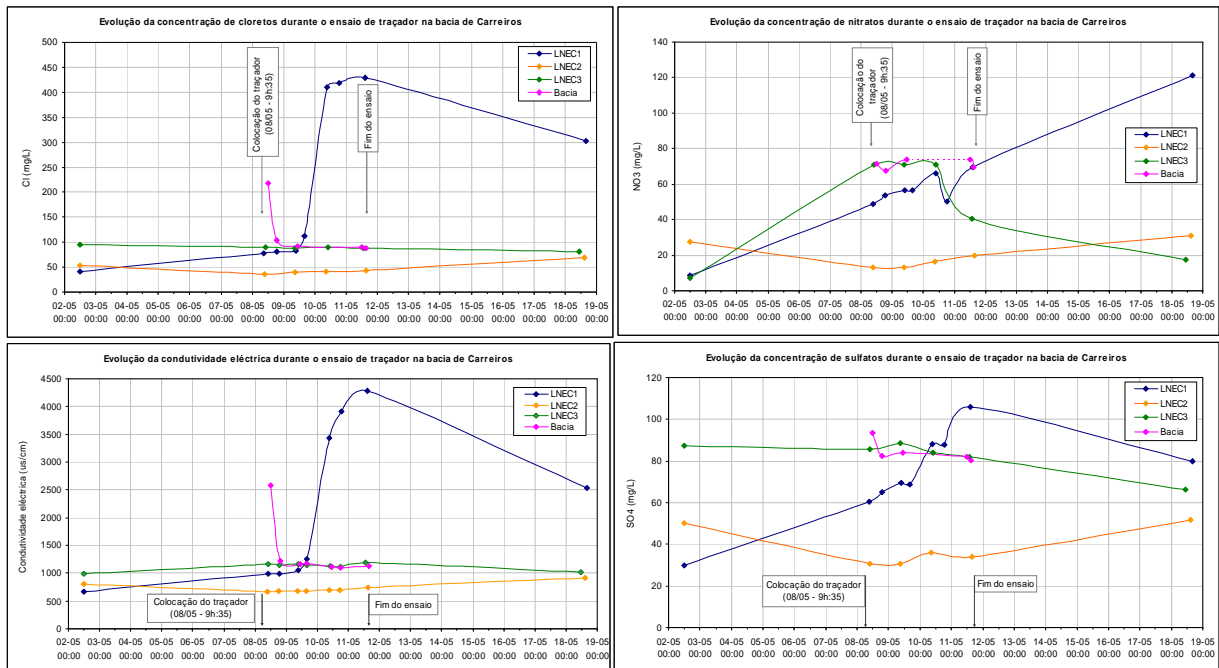


Figura 5.54 – Evolução de parâmetros de qualidade da água durante o ensaio de traçador na bacia de Carreiros

5.4.7 Aplicação de métodos geofísicos de resistividade eléctrica durante o ensaio de traçador

A análise do caso de estudo de Carreiros, durante o ensaio de traçador, foi aprofundada recorrendo à aplicação de métodos geofísicos de resistividade eléctrica. As campanhas de geofísica e a interpretação dos resultados obtidos foram realizadas pelo Núcleo de Geologia de Engenharia e Ambiente do Departamento de Geotecnia do LNEC, no âmbito do Projecto Gabardine (cf. Mota, 2007).

O principal objectivo consistiu em determinar pela análise das tomografias resultantes de vários perfis de resistividades eléctrica o sentido de escoamento subterrâneo na zona circundante das bacias de infiltração do leito do rio. A situação de referência, antes da realização do ensaio de infiltração, foi caracterizada no final de Janeiro de 2007. Nesta altura foram realizados os primeiros cinco perfis, um longitudinal e quatro transversais ao leito do rio (Perfil I a V). Em Maio, a situação de referência foi de novo representada pouco antes da realização do ensaios. Durante a realização do ensaio de infiltração e de traçador, entre o dia 4 e 11 deste mês, foram repetidas as leituras dos perfis para diferentes intervalos de tempo. Dois novos alinhamentos (Perfil VI e VII) foram incluídos com o objectivo de detectar uma eventual migração da anomalia de baixa resistividade devida à injeção do traçador, para W ou E do rio Seco. Foram realizados no seu conjunto sete perfis de resistividade eléctrica com dispositivo Dipolo-Dipolo, localizados na Figura 5.55, seguindo os alinhamentos que se apresentam no Quadro 5.13. No conjunto foram realizados 30 perfis, seguindo os alinhamentos referidos. Contudo, foi seleccionado o perfil longitudinal, ao longo do leito do rio, que atravessa as duas bacias (Perfil I), para se proceder à repetição da leitura em intervalos de tempo consecutivos durante o ensaio de traçador. A identificação dos perfis com a designação de Perfil I ao Perfil VII, incluiu a data e hora de realização do mesmo (Mota, 2007).



Figura 5.55 – Localização dos sete perfis de resistividade eléctrica realizados no caso de estudo de Carreiros (Mapa de base retirado do *Google Earth*) (extraído de Mota, 2007)

Quadro 5.13 – Perfis de resistividade eléctrica e alinhamentos direccionais

Perfil de resistividade eléctrica	Alinhamento	Localização
Perfil I	NNW-SSE	Longitudinal, ao longo do leito do rio
Perfil II	NW-SE	Transversal ao leito do rio, a montante das bacias
Perfil III	ENE-WSW	Transversal ao leito do rio, intersecta a bacia Norte
Perfil IV	NE-SW	Transversal ao leito do rio, intersecta a bacia Sul
Perfil V	ENE-WSW	Transversal ao leito do rio, intersecta o piezómetro LNEC1
Perfil VI	NNW-SSE	Longitudinal, margem esquerda
Perfil VII	NNW-SSE	Longitudinal, margem direita

A prospecção por métodos eléctricos baseia-se na geração de um campo eléctrico, através da injeção de corrente eléctrica no terreno por meio de dois eléctrodos metálicos, e medição da diferença de potencial eléctrico entre dois outros pontos. As variações mais significativas do campo eléctrico podem corresponder a heterogeneidades litológicas ou a anomalias de resistividade dos materiais. Tendo em conta que a corrente eléctrica se propaga no terreno através do electrólito composto pela água existente nos intervalos entre as partículas do solo e os sais nela dissolvidos, a resistividade depende não só da porosidade do material que compõe o terreno, como também do seu teor em água e da concentração dos iões nela dissolvidos (Mota, 2006).

A execução dos perfis geoelectricos foi realizada com o equipamento *Lund Imaging System* da ABEM, um sistema automático composto por quatro cabos multi-condutores e 41 eléctrodos de aço, pelo módulo LUND ES 464 e pelo resistivímetro ABEM *Terrameter SAS 4000*. A inversão dos dados obtidos da pseudo-secção de resistividades aparentes, ou seja, a obtenção das tomografias geoelectricas 2D, que representam graficamente uma imagem bidimensional da variação da resistividade do terreno em profundidade, foi efectuada utilizando o programa *Res2Dinv v3.51* (Mota, 2006).

Existem diversos dispositivos de prospecção geoelectrica, pelo método da resistividade. A utilização do dispositivo Dipolo-Dipolo foi, segundo Mota (2006), devida a elevados contrastes laterais e à influência topográfica na zona próxima das bacias de infiltração. Todos os perfis foram realizados com uma distância entre dipolo de 3 m, o que um total de 120 m de comprimento para cada perfil, 40 dipolos e uma profundidade máxima de investigação de 16 m.

Os modelos de resistividade apresentados em Mota (2006) utilizam a mesma escala graduada de cores, para facilitar a comparação de resultados. Considerou-se que o nível zero da superfície topográfica corresponderia à superfície do leito do rio e que todos os perfis foram realizados com os números de dipolo mais baixos na direcção Norte ou Oeste. O Quadro 5.14 apresenta e descreve todas as leituras efectuadas nos alinhamentos referidos. O Perfil I, que corresponde ao perfil longitudinal, foi seleccionado para a repetição das leituras, com intervalos de aproximadamente 12 em 12 horas. O modelo de resistividade eléctrica resultante neste perfil, que se apresenta na Figura 5.56, corresponde à situação de referência (Janeiro de 2007) e contém a localização dos piezómetros LNEC e de outros perfis de resistividade que cruzam este alinhamento N-S. A Figura 5.58 mostra a sequência de resultados do modelo de resistividades eléctricas calculado para este perfil. Os resultados obtidos nos perfis transversais ao leito do rio (Perfil II a V), correspondentes à situação inicial, podem observar-se na Figura 5.57, os restantes realizados durante o ensaio são apresentados em Mota (2007).

Quadro 5.14 – Perfis de resistividade eléctrica realizados em Carreiros, antes, durante e após o ensaio de infiltração e traçador (informação extraída de Mota, 2007)

Data - Hora	Perfis realizados	Observações
22/Janeiro	Perfis I a V	Situação de referência no período húmido
02/Maio	Perfis I a V	Situação de referência no período seco – antes do enchimento da bacia
04/Maio	Perfis I, III, IV e V	Após o 1º enchimento da bacia – situação de referência com a bacia saturada
07/Maio	Perfis I, IV e V	Após o 2º enchimento da bacia – situação de referência com a bacia saturada, no dia anterior ao do ensaio
08/Maio – 10h:55 08/Maio – 17h:15 09/Maio – 8h:30 09/Maio – 16h:31 10/Maio – 8h:35 10/Maio – 17h:00 11/Maio – 14h:00	Perfil I	Após a colocação do traçador (no dia 08/05 às 9h:00), as medições foram efectuadas sensivelmente de 12 em 12 horas, durante três dias de ensaio, com a bacia saturada e uma altura de água de 20 cm.
09/Maio	Perfil V	Um dia após o a colocação do traçador, com a bacia saturada
10/Maio	Perfil VI	Dois dias após o a colocação do traçador, com a bacia saturada
11/Maio	Perfil VI, VII	Três dias após a colocação do traçador, com a bacia saturada
18/Maio	Perfil I, V, VI	Dez dias após a colocação do traçador (bacia já sem água)

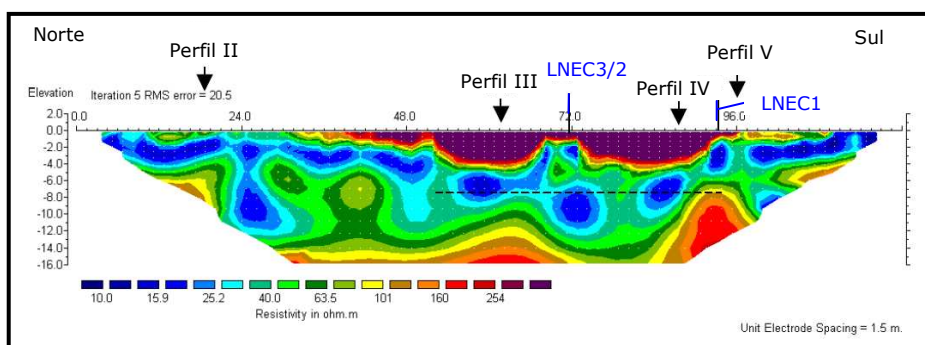


Figura 5.56 – Modelo de resistividade eléctrica resultante no Perfil I, correspondente à situação de referência (Janeiro de 2007), localização dos piezómetros LNEC e de outros perfis de resistividade que cruzam este alinhamento N-S (adaptado de Mota, 2007)

As principais conclusões da prospecção geofísica pelo método da resistividade eléctrica, apontadas em Mota (2007) e Mota *et al.* (2008), são as seguintes:

- Clara identificação das bacias de infiltração, caracterizadas por elevada resistividade devido à elevada presença de vazios (porosidade de 40%). A diferença de altura das bacias em cerca de 2 m, face ao projecto (que determinou previamente uma

profundidade de 7 m), é atribuída a uma deficiente execução e à deposição de finos durante o Inverno, que colmataram parte dos vazios em profundidade, não permitindo assim identificar claramente a fronteira inferior;

- A saturação da bacia Sul (7/Maio) fez desaparecer a correspondente anomalia de elevada resistividade, surgindo em seu lugar uma zona de baixa resistividade, devido à presença da água que preencheu os vazios entre o cascalho;
- Clara identificação do traçador no início do ensaio, preenchendo uma parte significativa da bacia (anomalia de baixa resistividade eléctrica localizada nas coordenadas 75 e 93 do Perfil I de 07/05). Nos perfis seguintes, apesar da menor concentração e maior dispersão dos sais, foi ainda possível seguir o traçador salino no seu caminho descendente e para sul (anomalia em torno da coordenada 96 a 18/05);
- Destaca-se ainda a presença de uma anomalia vertical de baixa resistividade centrada no local do LNEC3 (coordenada 72), entre os dias 8 e 11 de Maio, a qual se correlaciona com o fluxo de água provocado pela bombagem;
- 11 dias depois de injectado no sistema, o sal havia sido diluído, a pluma salina deslocou-se no sentido do escoamento subterrâneo, e a bacia sul retoma a configuração da situação de referência.

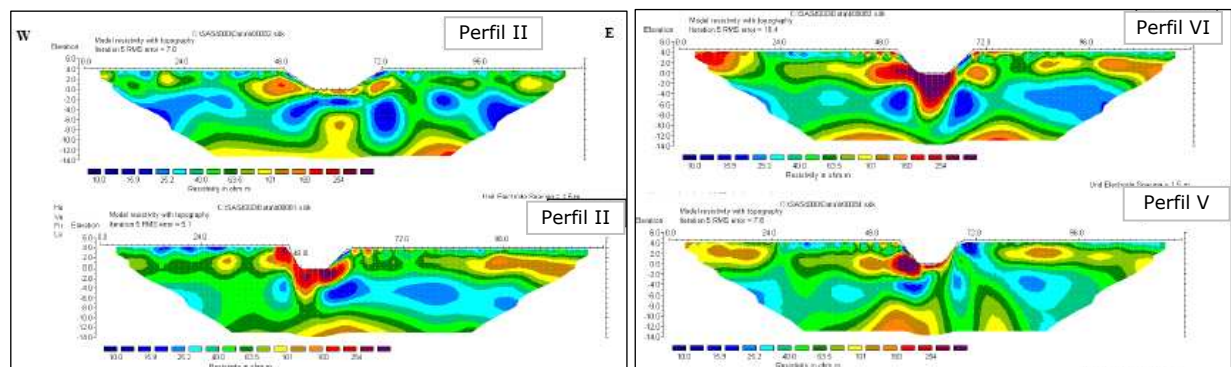


Figura 5.57 – Modelo de resistividade eléctrica para os perfis transversais ao leito do rio (Perfis II a V), correspondentes à situação de referência (Janeiro de 2007) (adaptado de Mota, 2007)

Contudo, a concentração nas águas subterrâneas só voltará à situação de referência com uma nova entrada de água para o meio subterrâneo, que ocorreu durante os primeiros eventos de escoamento e infiltração de água que se seguiram, em Agosto e Setembro de 2007 (Figura 5.41)

A detecção da pluma salina pelos métodos de resistividade eléctrica apresenta uma relação favorável comparativamente com os registos de condutividade eléctrica no LNEC1, permitindo detectar a sua migração espacial, no primeiro caso e temporal no segundo, durante a realização do ensaio de traçador na bacia. Este método de prospecção geofísica revelou-se uma ferramenta com potencialidades a considerar em qualquer fase de estudos de monitorização hidrogeológica.

5.5 Síntese conclusiva

Procurou-se sintetizar a informação obtida nos ensaios de recarga artificial em bacias de infiltração (Bacias na 1ª, 2ª e 3ª camada litológica do Areal Gordo e Bacias do leito do rio Seco) e em poços de grande diâmetro (ensaio de injeção na nora) e furos de diâmetro intermédio (ensaio de injeção no LNEC6), em termos de taxas de infiltração, com parâmetros físicos com os quais estes valores se relacionam, nomeadamente, a carga

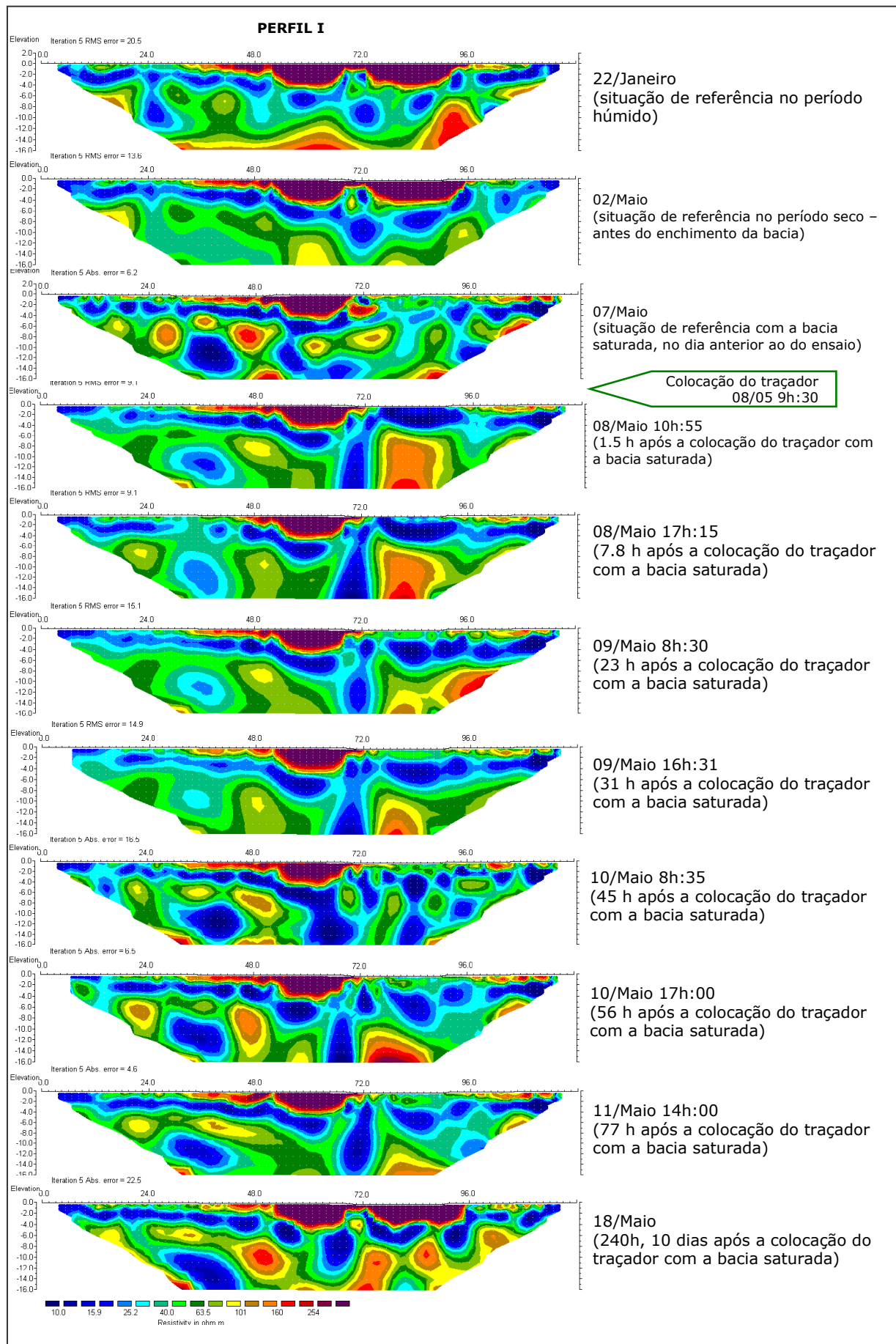


Figura 5.58 – Modelos de resistividade eléctrica obtidos no Perfil I, antes, durante e após o ensaio de traçador na bacia de infiltração do leito do rio Seco, em Carreiros (modificado de Mota, 2007)

hidráulica exercida pela coluna de água durante o ensaio e o tipo de solo, que neste caso se concretiza pela percentagem de areia nas amostras de solo respectivas.

A Figura 5.59 e a Figura 5.60 mostram o tipo de curvas de regressão, a correlação e a equação que pode ser obtida entre estas variáveis. Um dos objectivos deste tipo de análise consiste na possibilidade de poder extrapolar os resultados obtidos para outros locais, de acordo com o tipo de solo presente, ou prever taxas de infiltração em função do volume disponível para efectuar a recarga e eficiência esperada para o tipo de sistema de recarga. Estes resultados podem contribuir para o desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão em termos selecção de metodologias de recarga artificial, na medida em que representam variáveis facilmente estimadas e quantificadas em função das características intrínsecas dos solos dos locais ou em função da carga hidráulica. Este resultado resume um conjunto de informação obtida previamente e foi igualmente apresentado numa das reuniões do Projecto Gabardine (em Liège, Julho, 2008).

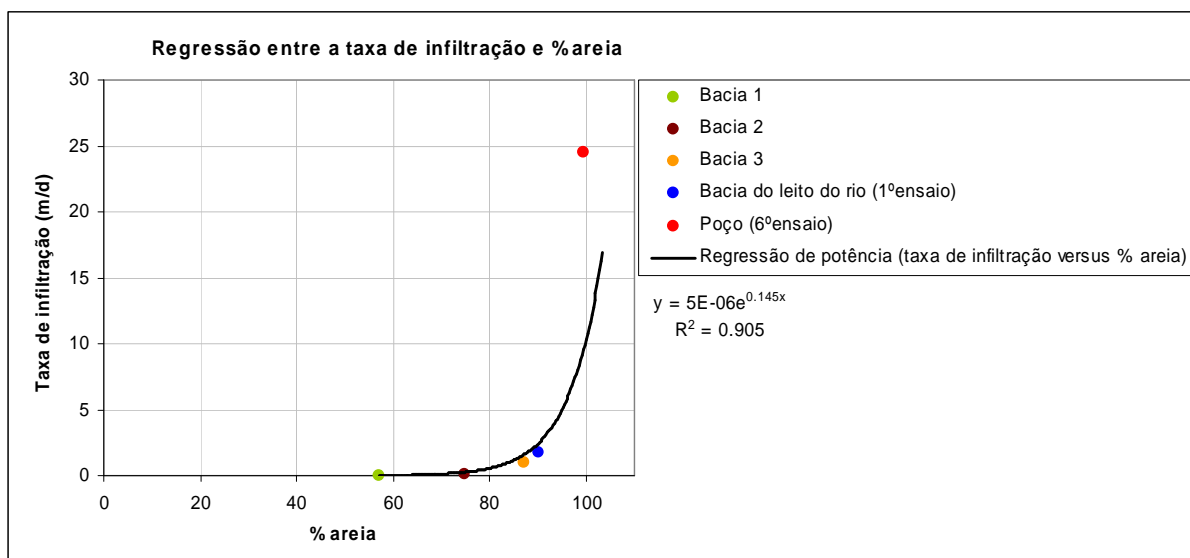


Figura 5.59 - Regressão entre a taxa de infiltração e a percentagem de areia

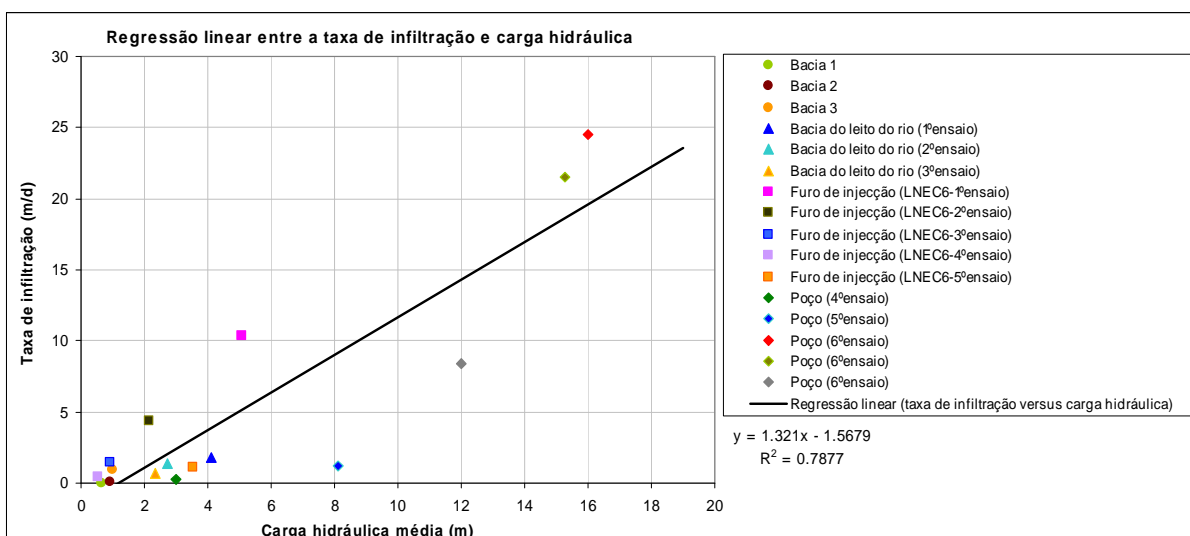


Figura 5.60 - Regressão linear entre a taxa de infiltração e carga hidráulica